

Abschlussbericht für das LuFo VI-1 Vorhaben

RoboCoop

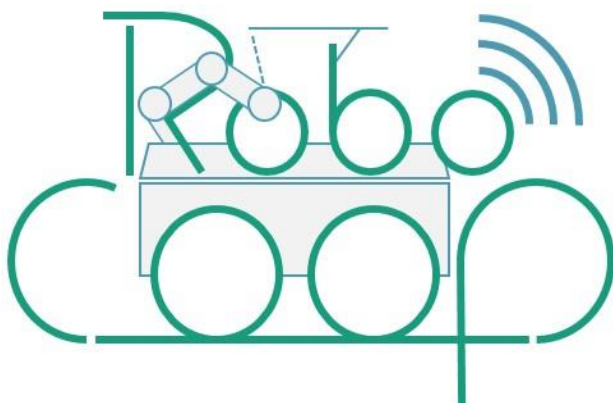
**Entwicklung eines kooperierenden Leichtbaurobotersystems
in Modulbauweise mit übergeordnetem, intelligentem
Managementsystem**

Förderkennzeichen: 20Q1923D

Geschäftszeichen: 100387169

Laufzeit des Vorhabens: 01.06.2020 – 31.12.2023

Ausführende Stelle: Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und
Angewandte Materialforschung IFAM
Ottenbecker Damm 12 | 21684 Stade



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	3
2	Voraussetzung der Vorhabendurchführung	5
3	Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4	Stand der Technik und Wissenschaft an welchen angeknüpft wurde	8
5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	12
6	Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis	13
6.1	HAP 0: Fraunhoferseitiges Projektmanagement	13
6.2	HAP 1: Digitalisierung und Managementsystem	13
6.3	HAP 2: Modularität mobiler Robotersysteme	25
6.4	HAP 5: Integration, Validierung und Dokumentation	52
7	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	60
8	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	60
9	Voraussichtlicher Nutzen	61
10	Bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens.....	62
11	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	63
12	Verzeichnisse	64
12.1	Literaturverzeichnis	64
12.2	Abbildungsverzeichnis	65
12.3	Tabellenverzeichnis	66
13	Durchführende Forschungsstelle	67

1 Aufgabenstellung

Das Gesamtziel des Fraunhofer IFAM innerhalb des Projektes RoboCoop lag in der Steigerung der Einsatzfähigkeit von mobiler Kleinrobotik durch eine Modularisierung der Hardware und Software und der Entwicklung eines intelligenten Managementsystems. Hierbei spielte insbesondere die Konzeptionierung einer generischen Aufnahme verschiedenster Module sowie die Ausgestaltung einer übergeordneten Managementinstanz eines Lernalgorithmus für Schwarmverhalten.

Innerhalb des Projektes RoboCoop stand für das Fraunhofer IFAM die Erhöhung der Effizienz und somit die Stärkung der Produktion in der Luftfahrt im Fokus. Durch einen breiten Einsatz von mobiler und standardisierte Kleinrobotik sollen die Werker bei wiederkehrenden und ergonomisch nachteiligen Fertigungsschritten unterstützt werden.

Als große Herausforderungen kristallisierten sich zwei Kernaspekte heraus. Einerseits die Zerlegung einer Applikation in ihre grundlegenden Funktionen und die adäquate Implementierung in Hardwaremodulen, andererseits das Verständnis aus der zu bewerkstelligen Aufgabe die erforderlichen Funktionalitäten automatisierungsgerecht mit den zur Verfügung stehenden Fähigkeiten der Hardware zu verbinden und dieses in einem Managementsystem zu integrieren.



Abbildung 1: Vision von RoboCoop in der Anwendung der Kabinenausstattung

Als Anwendungsszenario innerhalb der Flugzeugfertigung wurde die Ausstattung der Kabine gewählt. Es lassen sich hier eine Vielzahl verschiedener Anwendungen mit Bauteile hoch variabler Dimensionsausprägungen betrachten. Zudem ist die Umgebung der Kabinenmontage eine dynamische Umgebung, in der es immer wieder zu Begegnungen mit dem Werker kommt. In Abbildung 1 ist die Vorstellung möglicher Anwendungen der RoboCoop-Technologie in einer Kabinenmontageumgebung dargestellt.

Gemeinsam mit den Projektpartnern galt es hier neben der Umsetzung eines sehr dynamischen Hardwaresystems auch auf spezifische Belange des Einsatzes mobiler Kleinrobotik zu blicken.

So sollte seitens des Projektpartners Neobotix eine speziell für den Einsatz in Flugzeugrumpfsektionen mobilen Plattform entwickelt werden. Ein Teil der Aufgabe bestand darin, das Design mit Blick auf Standsicherheit bei gleichzeitig reduzierter Flächenbelastung zu optimieren. Das Fraunhofer IFAM unterstütze hierbei bei der Einbindung der Plattformsteuerung in die Gesamtstruktur des Managementsystems. Zudem wurden gemeinsam Anforderungen definiert, welche das Manövrieren in stark beengten Umgebungen aber auch das Navigieren im aus mehreren mobilen Systemen bestehenden Verbund ermöglichen.

Des Weiteren sollte die Erhöhung der Traglast von Leichtbaurobotern betrachtet werden. Gemeinsam mit dem Projektpartner Purtec war eine Hilfskinematik zu entwickeln, welche es marktüblichen Leichtbaurobotern erlaubt Traglasten von bis zu 50kg aufzunehmen. Die entsprechenden Schnittstelle zwischen Hilfskinematik und Leichtbauroboter sowie zwischen Manipulationswerkzeug und Hilfskinematik mussten definiert und ausgestaltet werden. Aber auch ein Konzept zur Einbindung der Ansteuerung der Hilfskinematik in die Prozessabläufe des Leichtbauroboters war Aufgabenbestandteil.

In Zusammenarbeit mit dem Projektpartner wireless.consulting galt es zudem die Einschränkung fehlender Erreichbarkeit durch Kommunikationsnetze zu eliminieren und damit den Mehrwert einer bedarfsgerechten Ausleuchtung zu schaffen. Hierbei lagen die Augenmerke des Fraunhofer IFAM auf der Definition der Kommunikationsstruktur, der Spezifikation der Kommunikationsanforderungen und der Einbindung der Kommunikationshardware in das Gesamtsystem.

2 Voraussetzung der Vorhabendurchführung

Das Fraunhofer IFAM entwickelt seit Jahren erfolgreich in Projekten kundenspezifische Lösungen im Bereich Automatisierung insbesondere für die Montage mittels Industrieroboter aber auch Leichtbaurobotik und AGVs sowie der digitalen Vernetzung dieser Einheiten.

Die Standardisierung der Hard- und Softwareelemente sowie der dazwischen befindlichen Schnittstellen hatte bereits in vielen Projekten zuvor einen hohen Stellenwert. Der grundsätzliche Gedanke war es stets die Nutzung jeglicher Produkte im Shopfloor für den gemeinsamen Einsatz tauglich zu machen, die Kommunikationsmöglichkeit zwischen allen Teilnehmern zu schaffen und durch Standardisierung die Einbindung verschiedenster Teilsystemen zu vereinfachen.

Ein wesentlicher Vorteil einer Standardisierung liegt in der Austauschbarkeit von Teilsystemen zur Erhöhung der Einsatzzeiten und damit sinnvolleren Nutzung sowie der Schonung von Ressourcen.

Es hat sich jedoch gezeigt, dass technologisch noch Lücken im Bereich der Konnektivität von Produkten verschiedener Hersteller vorhanden sind. Daher konzentriert sich das Vorhaben RoboCoop auf die Ausgestaltung einer einheitlichen Schnittstelle auf AGVs, welche dazu dient sich mit unterschiedlichen Aufbauten zu verbinden und dabei die Kraftkopplung und die Kommunikation zwischen AGV und Aufbauten übernehmen kann. Verschiedene Konzepte wurden bereits vereinfacht in vorangegangenen Projekten betrachtet, allerdings mangels fehlender Lösungen am Markt nicht weiter verfolgt. Mit einer vereinheitlichten Kupplungsmöglichkeit sind auch Kombinationen komplexerer Hardwaremodule mit unterschiedlich ausgeprägten Fähigkeiten möglich.

Durch die Nähe zu Airbus besteht ein enges Netzwerk zum potentiellen Endanwender, der zu einem regen Austausch über Systemanforderungen beigetragen hat. Im Laufe des Projekts hat sich Airbus jedoch als assoziierter Partner herausgezogen und die Arbeiten nicht weiter begleitet. Dennoch waren die bereitgestellten Anforderungen eine solide Grundlage, auf der das Projekt fortgeführt wurde. Aufgrund der örtlichen Gegebenheiten am Standort und der zur Verfügung stehenden Forschungshalle samt eines Rumpfdemonstrators konnten Versuche im Vollmaßstab und in einer für den Flugzeugbau typischen Umgebung durchgeführt werden.

Das Projekt stand unter einem hohem Einflusses der weltweiten Corona-Pandemie und der allgemeinen geopolitischen Lage. Dies äußerte sich in einem erhöhtem Aufwand bei der Durchführung der Arbeiten aufgrund eingeführter Schutzmaßnahmen aber auch in einem deutlich erschwerten Zugang zu benötigten Materialien und Geräten. Mit Umplanungen der Arbeiten, hoher Motivation aller Beteiligten und einer teils eigenen Herstellung von relevanten Teilen konnte das Projekt trotz der Widrigkeiten erfolgreich durchgeführt und abgeschlossen werden.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben RoboCoop wurde gemäß der Abbildung 2 in insgesamt sechs Hauptarbeitspaketen unterteilt. Fünf technische Hauptarbeitspakete, welche die Arbeiten zur Technologieentwicklung beinhalteten und das organisatorische Hauptarbeitspaket für das Projektmanagement, welches übergeordnet durch den Verbundführer wireless.consulting koordiniert wurde. Das Fraunhofer IFAM hatte die Koordination der Arbeiten und eine aktive Beteiligung in HAP 1 „Digitalisierung und Managementsystem“, HAP 2 „Modularität mobiler Robotersysteme“ und die HAP 5 „Integration, Validierung und Dokumentation“ übernommen.

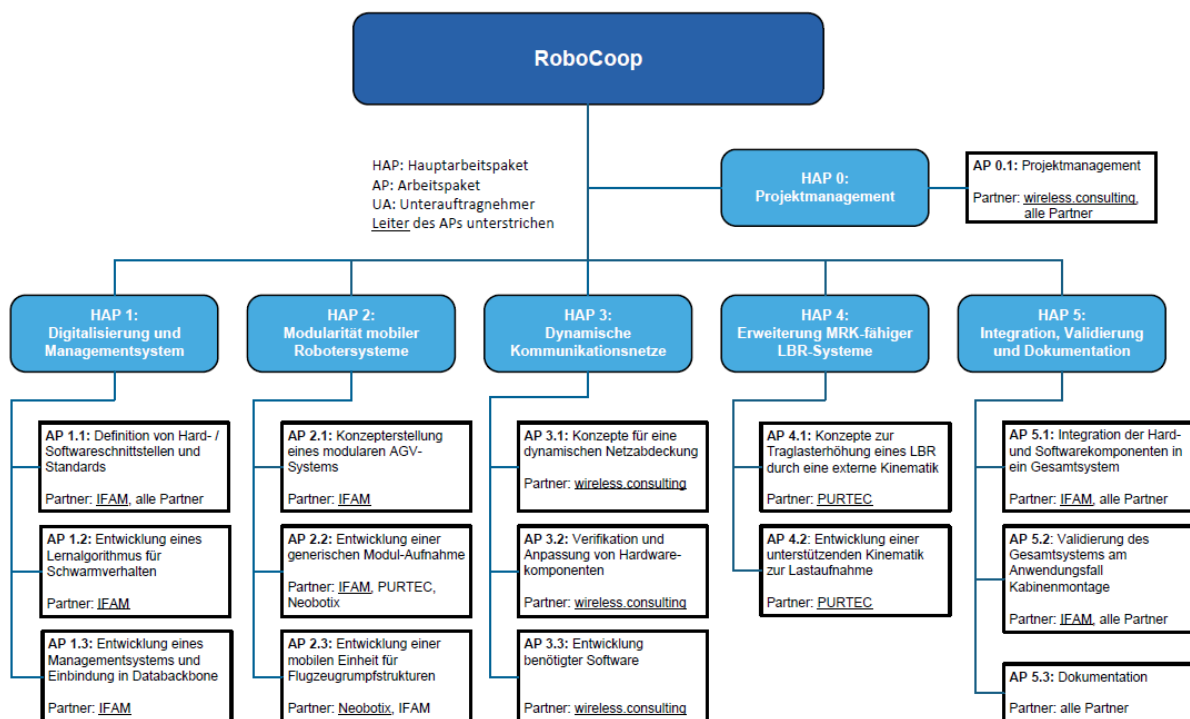


Abbildung 2 Projektstruktur des Verbundvorhabens RoboCoop

In Abbildung 3 ist der vorhabenspezifische Zeitplan für die Arbeitspakete des Fraunhofer IFAM nach erfolgter Laufzeitverlängerung dargestellt. Der dargestellte Zeitplan berücksichtigt den verzögerten Projektbeginn und die Verzögerungen aufgrund der COVID-19 Pandemie. Die Forschungsarbeiten konnten erst mit einer Verzögerung von drei Monaten nach der Zustellung des Zuwendungsbescheids beginnen. Grund hierfür war die verspätete Zustellung der Zuwendungsbescheide bei den Partnern.

Herausforderungen für das Vorhaben ergaben sich aus den Randbindungen infolge der COVID-19 Pandemie durch Einschränkungen im Betrieb am Fraunhofer IFAM bspw. durch eingeschränkten Zugang zu den Laboren und Anlagen. Des Weiteren hatte die weltweit angespannte Liefersituation

von Halbzeugen und Gerätschaften im Vorhaben zu erheblich verlängerten Beschaffungszeiten der für das Projekt relevanter Materialien geführt. In Summe führten diese Einschränkungen der Arbeiten zwischen den Projektpartnern zu einer Verzögerung von sieben Monaten. Durch eine kostenneutrale Verlängerung des Vorhabens konnten jedoch alle Arbeiten erfolgreich bearbeitet und abgeschlossen werden.

Arbeitspakete (AP) Projekt RoboCoop	Verantw.	2020				2021				2022				2023			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
HAP 0 Projektmanagement																	
HAP 1 Digitalisierung und Managementsystem																	
AP 1.1 Definition von Hard- / Softwareschnittstellen und Standards	IFAM																
AP 1.2 Entwicklung eines Lernalgorithmus für Schwarmverhalten	IFAM																
AP 1.3 Entwicklung eines Managementsystems und Einbindung in Databackbone	IFAM																
HAP 2 Modularität mobiler Robotersysteme																	
AP 2.1 Konzeptionierung eines modularen AGV-Systems	IFAM																
AP 2.2 Entwicklung einer generischen Modul-Aufnahme	IFAM																
AP 2.3 Entwicklung einer mobilen Einheit für Flugzeugrumpfstrukturen	Neobotix																
HAP 3 dynamische Kommunikationsnetze																	
AP 3.1 Konzepte für eine dynamischen Netzabdeckung	wireless con.																
AP 3.2 Verifikation und Anpassung von Hardwarekomponenten	wireless con.																
AP 3.3 Entwicklung benötigter Software	wireless con.																
HAP 4 Erweiterung KI-fähiger LBR-Systeme																	
AP 4.1 Konzepte zur Traglasterhöhung eines LBR durch eine externe Kinematik	PURTEC																
AP 4.2 Entwicklung einer unterstützenden Kinematik zur Lastaufnahme	PURTEC																
HAP 5 Integration, Validierung und Dokumentation																	
AP 5.1 Integration der Hard- und Softwarekomponenten in ein Gesamtsystem	IFAM																
AP 5.2 Validierung des Gesamtsystems am Anwendungsfall Kabinenmontage	IFAM																
AP 5.3 Dokumentation	alle Partner																

Abbildung 3: Arbeits- und Zeitplan des Verbundvorhabens RoboCoop

In der inhaltlichen Zielausrichtung des Vorhabens gegenüber der Antragstellung haben sich kleinere Änderungen auf Seiten des Fraunhofer IFAM ergeben. Dies betrifft einerseits den Lernalgorithmus, welcher nach intensiver Untersuchung der Möglichkeiten und des Einsatzes nicht weiter mit einem KI-Ansatz verfolgt wurde. Die Komplexität der Gesamtstruktur ließ eine sinnvolle Implementierung eines Machine Learning Systems zu diesem Zeitpunkt nicht zu, da zunächst die grundlegende Architektur des Gesamtsystems und die Einzelkomponente zu entwickeln waren und die erforderlichen Daten zum Trainieren einer KI nicht zur Verfügung standen. Darüber hinaus wurde bei der Integration der Teiltechnologien in das Gesamtsystem die Hilfskinematik nicht weiter berücksichtigt. Die Hilfskinematik konnte nicht wie geplant vom Projektpartner bereitgestellt werden. Weshalb die Validierung der Traglasterhöhung im Gesamtkonzept nicht erfolgte. Auf den Projekterfolg hatten die minimalen Änderungen jedoch keinen Einfluss.

4 **Stand der Technik und Wissenschaft an welchen angeknüpft wurde**

Schwarmrobotik ist ein Ansatz zur Koordination einer größeren Anzahl von relativ einfachen Robotern, die autonom agieren, miteinander kommunizieren und gemeinschaftlich eine Aufgabe erfüllen [SHARKEY 06]. Die Technologie wurde hierbei abgeleitet aus Naturbeobachtungen (Abbildung 4). So weisen bestimmte Tierarten, wie zum Beispiel Ameisen, sowie manche Arten von Fischen und Vögeln ein Schwarmverhalten auf, wodurch im Kollektiv Ziele erreicht werden, die durch die einzelnen Individuen nicht erreicht werden könnten.



Abbildung 4: Schwarmintelligenz in der Natur

Im Schwarm agierende System weisen folgende Charakteristiken auf [YOGESWARAN 10]:

1. Parallelisierung: Der Roboterschwarm kann aufgeteilt werden, um Aufgaben in parallelen Teilaufgaben zu erledigen.
2. Robustheit: Der Ausfall eines Roboters kann durch den Schwarm kompensiert werden
3. Skalierbarkeit: Die Anzahl der Roboter im Schwarm lässt sich ohne zusätzliche Aufwände vergrößern, um beispielsweise die Arbeitsleistung zu verbessern.
4. Flexibilität: Der Roboterschwarm adaptiert autonom seine Architektur und sein Verhalten durch Konfiguration, wenn Aufgabenstellungen und Umgebungsbedingungen sich verändern.
5. Aufgabenkomplexität: Der Roboterschwarm kann Aufgaben lösen, die für einzelne Roboter zu komplex oder gar unmöglich sind.
6. Kostengünstig: Die Herstellung oder Beschaffung einer Vielzahl gleichartiger einfacher Roboter kann günstiger sein als einige wenige Roboter, die darauf spezialisiert sind alle Aufgaben einzeln zu lösen.

Im Allgemeinen unterscheidet man hinsichtlich der Kontrolle von Roboterschwärmen zwischen einer zentralen und einer dezentralen Steuerung [STEELE 07]. In der zentralen Variante existiert eine Instanz, die den Überblick über den Schwarm hat, die Entscheidungen trifft und Befehle an die einzelnen Roboter sendet. Dies hat den Vorteil, dass die steuernde Instanz aus den gesammelten

Informationen der einzelnen Roboter optimale Pläne erstellen kann. Ein Nachteil des zentralen Ansatzes ist der Totalausfall des Roboterschwarms im Fall eines Fehlers in der zentralen Steuereinheit. Weiterhin können Reaktionszeiten mitunter länger dauern, weil die Information erst zur Zentralinstanz geleitet werden muss und dann wieder zurück zum Roboter.

Die dezentrale Steuerung funktioniert ohne Zentralinstanz. Informationen werden untereinander zwischen den Robotern geteilt. Entscheidungen werden durch gemeinsame Prozesse getroffen. Der Vorteil der dezentralen Steuerung liegt in seiner hohen Ausfallsicherheit. Die Handlungsfähigkeit des Schwarms bleibt erhalten, wenn einzelne Roboter fehlerbedingt ausfallen. Dezentrale Systeme können zudem schneller auf äußere Umwelteinflüsse reagieren und sich reorganisieren, weil die Rechenoperationen durch die Verteilung auf die einzelnen Roboter parallel ablaufen. Nachteile ergeben sich aus den oftmals nur lokalen Informationen, die nicht immer zu einem Gesamtbild zusammengefügt werden, sowie durch die unabhängige Durchführung von Aktionen, die aufgrund mangelnder Koordination Probleme verursachen kann.

Maschinelles Lernen

Die Steuerung eines Roboterschwarms zur Erreichung eines Ziels kann nicht mit Hilfe linearer Programmierung erfolgen, die schrittweise für jeden Roboter vorgibt, wie er sich bewegen soll. Die Komplexität der Steuerung eines Schwarms bedarf daher einer der Aufgabenstellung angepassten Form des maschinellen Lernens. Im Wesentlichen können hier je nach Aufgabenstellung Algorithmen des überwachten oder unüberwachten Lernens angewendet werden.

Beim Überwachten Lernen verfügt das System über Expertenwissen oder die Kenntnis von Naturgesetzen. Mit dessen Hilfe ist ein zuvor festgelegtes Ziel zu erreichen. Den Weg dorthin bzw. die notwendigen Steuerungsparameter müssen erlernt werden durch den Vergleich mit dem erwarteten Ergebnis. Übliche Methoden basieren meist auf induktivem Lernen wie zum Beispiel das Lernen mit Entscheidungsbäumen [QUINLAN 86], logisches Schlussfolgern [MITCHELL 97], fall-basiertes Schlussfolgern [SIM 2003] und neuronale Netzwerke [POMERLEAU 90].

Unüberwachtes Lernen ist gekennzeichnet durch das Fehlen von Vorabinformationen und Zielwerten [ALPAYDIN 04]. Das System versucht daher Muster in den Inputwerten zu erkennen und daraus Strukturen und Abhängigkeiten abzuleiten. Beispiele für unbewachtes Lernen sind das automatische Clustern und die Komprimierung von Daten zur Dimensionsreduktion. Eine häufig angewandte Methode des unbewachten Lernens ist das bestärkende Lernen [FERNANDEZ 05]. Hierbei lernt ein Roboter durch positive und negative Belohnung zu bestimmten Zeitpunkten. Dem Roboter werden hierbei keine direkten Anweisungen gegeben. Die Entwicklung geeigneter Verhaltensregeln geschieht hierbei durch eine Nutzenfunktion, die Verhaltensweisen in bestimmten Situationen

aufgrund der externen Belohnungen bewertet. Geeignete Algorithmen sind beispielsweise die Monte-Carlo-Methode und Temporal Difference Learning. Diese Algorithmen wurden unter anderem von AlphaGo verwendet, einer künstlichen Intelligenz von Google, die im Jahr 2016 den südkoreanischen Profi Lee Sedol im Brettspiel Go besiegte. [CHOROWSKY 19] Ein weiteres moderneres Verfahren dieser Kategorie ist das evolutionäre Lernen, welches genetische Algorithmen verwendet, die sich über Selektionsprozesse weiterentwickeln ähnlich der natürlichen Evolution von Lebewesen [RAM 1994].

Modularität von Robotersystemen

Im Zeitalter von Industrie 4.0 sind wandlungsfähige Lösungen gefragt, um Spitzen in der Auslastung oder Engpässe bei den Ressourcen abzufedern. Ein weiterer Treiber ist der höhere Individualisierungsgrad von Produkten, der eine steigende Anzahl von Varianten zur Folge hat. Um die zukünftige Wettbewerbsfähigkeit zu sichern, werden neue Produktionskonzepte benötigt, die eine Skalierbarkeit in der Gesamtkapazität der Anlage, des Produktes und der Variantenvielfalt ermöglichen.

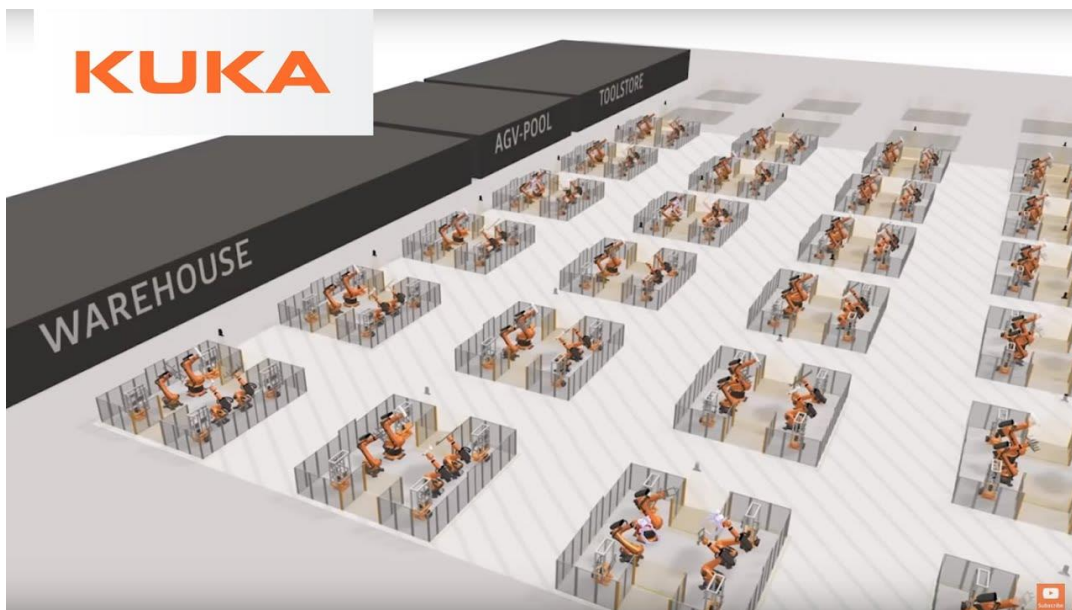


Abbildung 5: Matrixproduktion: Die Produktion von morgen

Eine Lösung bietet die Firma Kuka mit der Matrixproduktion (Abbildung 5). Ein wesentliches Prinzip ist hierbei die Trennung von Logistik und Produktion. Die Logistik erfolgt durch Automated Guided Vehicles (AGVs) und ist für den Transport von Bauteilen und Werkzeugen verantwortlich. Die Produktion erfolgt in matrixförmig angeordneten Produktionszellen, in welchen eine Gruppe von Robotern Teilschritte der Gesamtproduktion durchführen. Die Produktionszellen sind standardisiert

und gleichartig. Die Anpassung an die jeweiligen Produktionsschritte geschieht über prozessspezifisches Equipment und Manipulatoren, welche beispielsweise für Schweißen, Kleben, Stanzen, Löten und Clinchen benötigt werden. Innerhalb einer Produktionszelle können die Roboter ihre Werkzeuge über Drehtische auswechseln. Im Fall von Nachfrageschwankungen des Produkts können in einzelnen Produktionszellen die Werkzeuge der Roboter ausgetauscht werden, um die Produktionsraten der jeweiligen Produkte anzupassen (Abbildung 6). Die Auswechslung der Werkzeuge übernehmen AGVs. Sie fahren in eine Produktionszelle und erhalten von den Robotern die auszuwechselnden Werkzeuge. Die AGVs transportieren diese in ein Lager und liefern einen Satz von neuen Werkzeugen, um ein anderes Bauteil oder eine spezielle Variante davon herzustellen. Die autonom fahrenden AGVs können unterschiedliche Bauteile oder Werkzeuge über individuell konfigurierbare Lastaufnahmemittel aufnehmen und transportieren. Die Umrüstung der AGVs mit verschiedenen Lastaufnahmemitteln kann ebenfalls automatisch in einem Lager erfolgen. Durch dieses Konzept können einzelne Produktionszellen zu Wartungszwecken oder zur Umrüstung temporär außer Betrieb genommen werden, während die Produktion zuvor auf andere Produktionszellen verschoben wurde. Somit ist eine unterbrechungsfreie Produktion möglich. Der Ausbau der Produktionskapazitäten erfolgt durch Hinzufügen weiterer Produktionszellen und AGVs.



Abbildung 6: exemplarische Standardzelle in der Matrix-Produktion.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Vorhaben wurde bereits zu Projektbeginn gezielt ein enger persönlicher Austausch angestrebt. Hierzu wurden neben den Projekttreffen, welche abwechselnd bei den Partnern vor Ort stattfinden sollten, Arbeitsmeetings auf HAP-Ebene vereinbart. Damit sollte vor allem der Austausch zwischen den Experten der verschiedenen Themenbereiche und Partnern sichergestellt werden.

Durch den Ausbruch der Covid-19 Pandemie war dieses Vorgehen aufgrund der Pandemiemaßnahmen nicht vollständig umsetzbar. Die durch die Corona-Maßnahmen hervorgerufenen Beschränkungen im Zugang zu den Arbeitsstätten erforderten vom Konsortium eine Anpassung auf digitale Formate.

In der Zusammenarbeit mit den Projektpartnern ist insbesondere die Anforderungsdefinition als Bestandteil des Arbeitspakets 1.1 hervorzuheben. Das Fraunhofer IFAM koordinierte den Austausch zwischen den Verbundpartnern und Airbus als assoziierten Partner. Ziel hierbei war es, die Technologiebausteine für den Einsatz in der Flugzeugfertigung zu befähigen. Darüber hinaus wurde seitens des Fraunhofer IFAM die Definition der Anforderungen und Schnittstellen der Partnerentwicklungen koordiniert.

Im Hauptarbeitspaket zwei der „Modularität mobiler Robotersysteme“ war es Aufgabe von Neobotix eine mobile Roboterplattform für den Einsatz in Flugzeugrumpfstrukturen zu entwickeln. Das Fraunhofer IFAM brachte hierzu die Anforderungen hinsichtlich Design, Funktionalität und Schnittstellen ein. Des Weiteren brachte das Institut in einem intensiven Austausch auch sein Wissen ein, um die Umsetzung der Robotersteuerung im ROS2 Framework zu bewerkstelligen. Auf Basis der Ergebnisse einer Masterarbeit des Fraunhofer IFAM zur Navigation einzeln oder im Verbund fahrende AGVs wurden in direkter Zusammenarbeit entsprechende Methoden in die Steuerung implementiert.

Mit dem Projektpartner wireless.consulting erstreckte sich die Zusammenarbeit in zahlreichen Arbeitstreffen über die Ausgestaltung der Kommunikationsstruktur. Das Fraunhofer IFAM stellte die Anforderungen und eine grundlegende Systematik der Kommunikationswege zwischen einzelnen Systemteilnehmer. Die Umsetzung und der Aufbau des Netzwerks und die Validierung am Standort Stade wurde vom Fraunhofer IFAM unterstützend begleitet.

Ebenfalls in gemeinsamen Arbeitstreffen hat das Fraunhofer IFAM in direkter Zusammenarbeit mit Purtec an der Ausgestaltung einer Hilfskinematik als Kooperationsmöglichkeit mit einem Leichtbauroboter zur Aufnahme von Traglasten gearbeitet. Das Fraunhofer IFAM hat hierbei die grundlegenden Designanforderungen gestellt. Zudem unterstützte das IFAM bei der Arbeitsraumsimulation und der Analyse des dynamischen Kipppunkts sowie der Ausgestaltung der Schnittstelle.

6 Verwendung der Zuwendung und erzielttes Ergebnis

Das Fraunhofer IFAM war in allen Hauptarbeitspaketen beteiligt. Die Beteiligung in den Hauptarbeitspaketen drei und vier beschränkte sich jedoch auf eine Zuarbeit und Beratung. Die Bearbeitung der fachlichen Inhalte erfolgte in den Hauptarbeitspaketen eins, zwei und fünf. Eine detaillierte Aufführung der Arbeiten des Fraunhofer IFAM mit Fokus auf Verwendung der Zuwendung sowie den Ergebnissen ist in den nachfolgenden Abschnitten aufgelistet.

6.1 HAP 0: Fraunhoferseitiges Projektmanagement

Die Arbeiten in diesem Hauptarbeitspaket beinhalteten die Planung der Fraunhofer IFAM Aktivitäten im Projekt, die Verfolgung der definierten Projektziele, die Absprache der Arbeitsinhalte mit den Projektpartnern sowie der kontinuierlichen Überprüfung des inhaltlichen und terminlichen Projektfortschrittes.

6.2 HAP 1: Digitalisierung und Managementsystem

Im Hauptarbeitspaket 1 wurden neben den im Projekt gültigen Standards und erforderlichen Schnittstellen ein intelligentes System entwickelt, mit dem sich kooperativ agierende Teilnehmer in einem schwarmähnlichen System zu übergeordneten mobilen Produktionseinheiten zusammensetzen lassen, um bestimmte Aufgaben zu erfüllen und einem dafür erforderlichen Managementsystem zur Verwaltung der verschiedensten Produktionssysteme ausgearbeitet.

6.2.1 AP 1.1: Definition von Hard-/Softwareschnittstellen und Standards

Im AP 1.1 wurden die funktionalen Anforderungen an zuvor identifizierten Hardware- und Softwareschnittstellen definiert. Diese werden für die Integration der Einzeltechnologien und im speziellen für die Entwicklung einer generischen Modulaufnahme benötigt.

Schon existierende Standards für den jeweiligen Einsatzzweck wurden berücksichtigt und falls überhaupt vorhanden auf ihre Eignung im Projekt geprüft und dementsprechend übernommen oder durch eine Neuentwicklung ersetzt.

Hardwareschnittstellen

Dabei handelt es sich hardwareseitig um ein Interface zwischen AGV und den sogenannten Arbeitsmodulen (funktionale AGV Aufbauten), um die Anbindung zwischen Stand-Alone-Modul (SAM) und Arbeitsmodul sowie um die Verbindung zwischen Werkzeug des Roboters und Roboterflansch. Für Letzteres existieren auf dem Markt ausreichend vielfältige Lösungen, der Vollständigkeit halber wird die hier benötigte Funktionalität dennoch erläutert. Unbekannte Begrifflichkeiten lassen sich detaillierter beschrieben und mit Grafik versehen dem Glossar entnehmen.

Die im AP1.1 festgehaltenen Anforderungen an die Schnittstelle zwischen Roboterflansch und Roboterwerkzeug lauten wie folgt:

- Bei Energieabfall soll die Verbindung stabil bestehen bleiben
- Der Energieaufwand zum An- und Abkoppeln soll so gering wie möglich ausfallen, da es sich um ein mobiles Gesamtsystem handelt, welches auf Batterien als Energiequelle setzt
- Die Position des Werkzeugs relativ zum Roboterflansch muss im gekoppelten Zustand definiert sein (geringes bzw. kein Spiel)
- Beim Koppelvorgang soll ein Toleranzausgleich zwischen Fest- und Loseil stattfinden (erleichtertes Einfädeln auch bei leichter Positionierungengenauigkeit)
- Die Kupplung sollte zusätzlich manuell lösbar sein (für manuellen Eingriff bei Fehlfunktionen oder Energieausfall)
- Fest- und Loseil haben Anschlussstellen für die Durchführung von Medien (Druckluft / Strom)
- Die Traglast des Werkzeugwechselsystems entspricht mindestens der Robotertraglast

Die Anforderungen an die Schnittstelle zwischen AGV und Arbeitsmodulen lauten wie folgt:

- Bei Energieabfall soll die Verbindung stabil bestehen bleiben
- Eine Entnahme der Arbeitsmodule aus einer starren Ablage muss möglich sein, dazu werden mindestens 3 verschiedene Hubhöhen benötigt
- Der Kupplungsvorgang muss über die Stirnseiten erfolgen, da auch differenziell angetriebene AGVs zum Einsatz kommen können, welche nicht seitlich ein- und ausfahren können
- Ein Toleranzausgleich bei der AGV-Einfahrt sowie bei der Kupplung über den Hub muss vorhanden sein, um Ungenauigkeiten bei der AGV-Positionierung auszugleichen
- Die Traglast muss mindestens die Traglast des schwächsten AGVs abdecken, dabei allerdings alle Arbeitsmodule handhaben können
- Nach Möglichkeit sollte die Schnittstelle so flach wie möglich ausgeführt werden, um die Höhe des Gesamtsystems aus AGV, Hubsystem und Arbeitsmodul möglichst gering zu halten
- Eine Erkennung des gekoppelten Arbeitsmoduls über die Schnittstelle ist wünschenswert

Die Anforderungen an die Schnittstelle zwischen Arbeitsmodul und SAM lauten wie folgt:

- Bei Energieabfall soll die Verbindung stabil bestehen bleiben

- Der Kupplungsvorgang muss über die Stirnseiten erfolgen, da auch differenziell angetriebene AGVs zum Einsatz kommen können, welche nicht seitlich ein- und ausfahren können
- Ein Toleranzausgleich bei der AGV-Einfahrt muss vorhanden sein, um Ungenauigkeiten bei der AGV-Positionierung auszugleichen
- Der Platzbedarf der Schnittstelle ist so gering wie möglich auszuführen, um die Länge des Arbeitsmoduls nicht unnötig zu vergrößern
- Eine Übertragung von Energie / Steuersignalen zu den Motoren im SAM muss über die Schnittstelle möglich sein, da das SAM keine eigene Energieversorgung / Logik enthält
- Eine Erkennung des gekoppelten SAM über die Schnittstelle ist wünschenswert

Basierend auf diesen Anforderungen wurden technische Lösungen für die einzelnen Schnittstellen recherchiert und übernommen oder neuentwickelt. Die Umsetzung wird in Kapitel 6.3 HAP 2: Modularität mobiler Robotersysteme beschrieben.

Softwareschnittstellen

Softwareseitig wird die Schnittstelle jeglicher Kommunikation die über das neu aufgebaute Mesh-Funknetz vom Partner wireless.consulting läuft über OPC UA realisiert. Dieser Standard bietet sich bei der Menge an verschiedenen Kommunikationsteilnehmern an und liefert die benötigten Funktionalitäten. Kommunizierende Einheiten sind die Single-Board-Computer (SBC) auf den Arbeitsmodulen, welche lokal die Sensoren und Aktuatoren auslesen und steuern, der Leitstand, welcher das übergeordnete Prozess- und Ressourcenmanagement übernimmt sowie die SBCs in den AGVs, die selbige Steuern und deren Betriebsparameter mitteilen können. Im Laufe des Vorhabens hat sich gezeigt, dass jegliche Kommunikation die von einer funktionalen Komponente nach außen oder von außen zu dieser Komponente stattfindet sinnvollerweise über ein einheitliches Kommunikationsmedium sowie eine standardisierte Schnittstelle stattfindet. OPC UA bietet, wie schon erwähnt, die benötigte Flexibilität bezüglich der Kommunikationsteilnehmer sowie einen reichen Funktionsumfang und dient daher als Schnittstelle. Das Kommunikationsmedium wurde von wireless.consulting im Rahmen des Projektes in Form eines Meshs entwickelt, welches zwei VLANs dynamisch in der Arbeitsumgebung aufspannt. Beide VLANs haben unterschiedliche Nutzungsschwerpunkte. Das „einfache“ Mesh wird für zeitunkritische Kommunikation genutzt, während das Device-2-Device-Mesh (D2D-Mesh) Übertragungen von Informationen benachbarter Geräte mit Latenzen unter einem definierten Schwellenwert gewährleistet. Die Kommunikation innerhalb der funktionalen Komponenten (AGV, Arbeitsmodul, etc.) ist aufgrund der Vielfältigkeit der verwendeten Geräte in dem Projektrahmen nicht standardisierbar und wird daher nicht einheitlich stattfinden. Somit wird intern im AM-Roboter beispielsweise zwischen dem Arbeitsmodul SBC und dem

Robotercontroller eine Ethernet-Schnittstelle genutzt, während RFID-Reader auf demselben Arbeitsmodul via Serial-Peripheral-Interface (SPI) vom SBC.

Wie bereits erwähnt, wurde die über das Mesh-Funknetz ablaufende Kommunikation grundsätzlich über festgelegte OPC UA Schnittstellen realisiert. Entsprechend wurden diverse Komponenten, darunter die Single-Board-Computer auf den AGVs und Arbeitsmodulen, aber auch der Aufzug am Demonstrator sowie der Leitstand mit OPC UA Servern ausgestattet, die über ein standardisiertes Interface kommunizieren.

Innerhalb des Flottenmanagements hat sich jedoch herausgestellt, dass zusätzliche Schnittstellen-Definitionen notwendig sind, die eine Kommunikation zwischen der auf OpenRMF basierenden Leitstand-Steuerung und den Neobotix-AGVs ermöglichen. Ursprünglich sollte hier die Kommunikation mittels FreeFleet-Server und -Client über CycloneDDS erfolgen. Da diese jedoch nicht den umfangreicheren Anforderungen der geplanten Prozessfunktionalitäten genügten, musste hier eine neue Schnittstelle definiert und implementiert werden. Aus diesem Grund wurde hierfür eine neue REST-API erstellt, über die sich Neobotix-AGVs ansteuern lassen. Eine ähnliche Schnittstelle bietet der MiR-Roboter bereits herstellerseitig, deren Implementierung jedoch nicht zugänglich und entsprechend erweiterbar ist.

6.2.2 AP 1.2: Entwicklung eines Lernalgorithmus für Schwarmverhalten

Im AP 1.2 wurde in Zusammenspiel mit AP 1.3 ein intelligentes System entwickelt, mit dem sich kooperativ agierende Teilnehmer und Module zusammensetzen lassen, um bestimmte Aufgaben aus dem Aufgabenverwaltungssystem zu bearbeiten. Bei der Ausgestaltung der Architektur hat sich gezeigt, dass dieses sinnvollerweise ganzheitlich mit dem Managementsystem konzipiert und entwickelt werden muss. Dazu müssen zunächst insbesondere die Teilsysteme und ihre Funktionalitäten definiert sein. Es wurde hierfür eine Architektur entworfen, welche die Teilsysteme als Prozessmanagementsystem zusammenfasst.

Der dadurch entstandene modulare Aufbau dieses Systems erlaubt es, einzelne Bestandteile unabhängig voneinander hinsichtlich ihrer Hauptfunktionalität zu optimieren. Für eine intelligente Aufgabenplanung und -ausführung sind von den in AP 1.3 erwähnten Teilsystemen hauptsächlich das Prozessplanungssystem („Process Planner“) und das Flottenmanagement verantwortlich. Die benötigten Daten für Planung und Ausführung der Prozessschritte werden von weiteren Modulen bereitgestellt, wie etwa die Fähigkeitsbeschreibungen durch den „Capability-Manager“ und aktuelle Zustände von Aufgaben und Ressourcen durch den „Task Manager“ bzw. „Resource Manager“.

Der für die Logistik zuständige Flottenmanager verwaltet die Transportressourcen, die einzeln bzw. im Schwarmverhalten Aufgaben abarbeiten. Die Planung und konkrete Ausführung ist also von der Ressourcenverfügbarkeit und weiteren Parametern abhängig wie Zustand, Standort und anderen Umgebungsvariablen. Durch den modularen Aufbau sind die in den Teilsystemen angewendeten Strategien z.B. durch spezielle Algorithmen anpassbar und erweiterbar, so dass eine weitere Optimierung möglich ist.

In der Gesamtarchitektur erfolgt eine Aufteilung der Ressourcen in Prozess-Ressourcen und Transport-Ressourcen. Prozess-Ressourcen sind jene Arbeitsmodule, die kooperativ die vorgegebenen Prozesse am definierten Arbeitsplatz ausführen und durch Transport-Ressourcen an ihren Bestimmungsort gebracht bzw. zwischen den verschiedenen Stationen bewegt werden. Die Intelligenz des Gesamtsystems ergibt sich somit aus der flexiblen und aufgabenspezifischen Zusammensetzung der Arbeitsmodule, der dynamischen Aufgabenverwaltung sowie der Logistik, welche sich ebenfalls dynamisch auf die aktuelle Umgebungssituation anpassen muss.

Prozessplanung

Die Prozessplanung erfolgt durch das „Process Planner“-Modul des in AP 1.3 entwickelten Prozessmanagementsystems. Als Eingangsinformation benötigt dieses eine semantische Beschreibung der Fähigkeiten, die von beteiligten technischen Ressourcen bereitgestellt werden können. Diese umfasst insbesondere eine Definition der benötigten Prozessparameter und Ressourcentypen. Im Robocoop-Projekt wurden diese durch das Einlesen statisch bereitgestellter Konfigurationsdateien durch den Capability-Manager bereitgestellt. Analog werden auch Informationen über die vorhandenen technischen Ressourcen bereitgestellt, die im „Resource Manager“ verwaltet werden. Zunächst wurde dies ebenfalls über eine entsprechende Konfigurationsdatei eingelesen, in der die Ressourcen mit zugehörigen Attributen wie „AssetID“, „AssetType“, dem OPC UA Endpoint, etc., sowie einer Auflistung der angebotenen Fähigkeiten beschrieben sind. Prinzipiell ist im Sinne der Industrie 4.0-Philosophie aber geplant, dass sich technische Ressourcen semantisch selbst beschreiben können und somit auf das Einlesen externer Konfigurationsdateien verzichtet werden kann. Im Verlauf des Projekt wurde dies teilweise durch die Einbindung eines „Local Discovery-Servers“ (LDS) erreicht, auf dem sich verfügbare Ressourcen selbständig anmelden. Andere OPC UA Clients können somit über den LDS anfragen, ob bestimmte Skills im Gesamtsystem von anderen Ressourcen angeboten werden und diese entsprechend kontaktieren. Auf weitergehende, komplexere semantische Beschreibungen der Ressourcen wurde allerdings in Robocoop verzichtet, da dies Forschungsschwerpunkt anderer Projekte ist, die z.B. umfangreiche Ontologien und ggf. einschlägige OPC UA Companion Specifications einbeziehen.

Dem Resource Manager ist durch die Einbindung des LDS der aktuelle Zustand sämtlicher Ressourcen bekannt. Bei der Durchführung von Prozessen wird der Status beteiligter Ressourcen durch den Task Manager aktualisiert, sobald diese zugewiesen bzw. gestartet wurden.

Mit den Informationen aus Capability Manager und Resource Manager erstellt der Process Planner einen Taskplan, in dem übermittelten Aufträgen konkrete Ressourcen zugewiesen werden. Dies geschieht durch sogenanntes „Machmaking“ zwischen benötigten Ressourcen und Skills und den verfügbaren. Zunächst werden aus der Liste der verfügbaren Ressourcen die geeigneten gefiltert, welche die benötigten Fähigkeiten zur Ausführung des Taskplans anbieten. Anschließend kann anhand von festgelegten Kriterien die bestgeeignete Ressource ausgewählt werden, z.B. Standort, benötigte Prozesszeit, Qualität, Betriebskosten etc. In Robocoop wurden hierfür allerdings nur statische Eigenschaften verwendet, da aufgrund der beschränkten Anzahl von Ressourcen, des zusätzlichen Implementierungsaufwands und der Datenverfügbarkeit ein umfangreicher Lernalgorithmus nicht realisiert werden konnte. Für einen solchen Algorithmus ist es notwendig, dass die entsprechenden Ressourcen ihre Prozessdaten aufzeichnen und anhand dieser historischen Daten Vorhersagen über die geplanten Prozesse bzw. die angefragten Parameter machen können, die als Auswahlkriterium für die Prozessplanung dienen. Dies kann durch sogenannte „Prediction Skills“ umgesetzt werden, was bereits Bestandteil von weiteren Projekten ist.

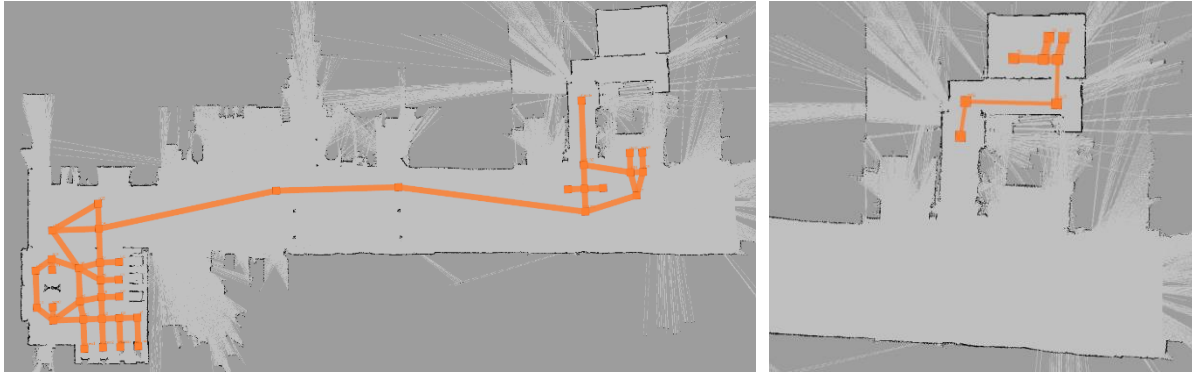
Flottenmanagement

Während die Prozessplanung die beteiligten Prozess-Ressourcen für die durchzuführenden Aufgaben auswählt, ist das Flottenmanagement für die Organisation und Steuerung der Transport-Ressourcen verantwortlich. Zu den Transport-Ressourcen gehören sämtliche mobile Roboter, in Robocoop sind dies drei Neobotix- und eine MiR-AGV. Das übergeordnete Prozessmanagementsystem erstellt je nach den Anforderungen im Taskplan Transportaufträge und schickt diese an das Flottenmanagement. Für das Flottenmanagement wurde das als Open Source verfügbare Open Robotics Middleware Framework (OpenRMF) als Basis gewählt, da dieses bereits umfangreiche Funktionen zur Integration heterogener mobiler Roboter sowie von Infrastrukturelementen wie ansteuerbare Türen, Aufzüge usw. bietet.

Da die Transportressourcen durch das Flottenmanagementsystem unabhängig von den Prozessressourcen verwaltet werden, übernimmt OpenRMF analog zum vorgenannten Process Planner die Auswahl und Steuerung der mobilen Roboter für die Logistikaufgaben. Dementsprechend obliegt es dem Flottenmanagement, eine Optimierung in der Selektion der Ressourcen sowie deren Navigation durchzuführen, um die Transportaufgaben effizient abzuarbeiten. Hierfür bietet OpenRMF bereits eine Bibliothek (rmf_task) inklusive eigenem Task Planner, der mittels A*-Algorithmus eine

optimale Verteilung der Aufträge an die vorhandenen mobilen Einheiten anstrebt und die Gesamtausführungsdauer minimiert. Dabei werden auch Standort und Batteriezustand berücksichtigt, sowie durch die Ressourcen zurückgegebene Restprozesszeiten.

Die Navigation erfolgt durch Graphen, die durch die Annotation von Knotenpunkten und Pfaden



auf einer Hallen-Karte manuell erzeugt werden. Ein solcher für das Robocoop-Projekt erstellter Navigationsgraph ist in Abbildung 7 für die beiden Ebenen zu sehen. In dem Graphen sind auch Ladestationen sowie der Fahrstuhl am Rumpfdemonstrator annotiert.

Abbildung 7 Navigationspfad in der Forschungshalle Ebenen 1 (links) und Ebene 2 (rechts)

In einem an OpenRMF geschickten Transportauftrag können ein Zielknoten und ggf. mehrere Wegpunktknoten vorhanden sein, anhand derer die Pfadplanung durchgeführt wird. Mit dem Traffic Scheduler und Blockade Moderator werden diese so geplant, dass es zu keinen Kollisionen und Blockaden kommt. Falls dies doch der Fall sein sollte (etwa durch auftretende externe Hindernisse), dann wird eine Alternativroute gesucht und beauftragt. Durch sogenannte Fleetadapter bekommt OpenRMF die Position und weitere Statusinformationen der mobilen Einheiten kontinuierlich mitgeteilt, sodass die Pfadplanung jederzeit bei Bedarf angepasst werden kann.

6.2.3 AP 1.3: Entwicklung eines Managementsystems und Einbindung in Databackbone

In AP 1.3 wurde ein Prozessmanagementsystem entwickelt, welches sämtliche Aktivitäten der ausgewählten Szenarien koordiniert, dem aber auch generisch neue Ressourcen und Aufgaben („Tasks“) hinzugefügt werden können. Zur Umsetzung wurden dabei Konzepte aufgegriffen, die der Industrie 4.0-Philosophie entsprechen.

Grundlage für die Prozess- und Ressourcenmodellierung ist hier ein bereits in der für Industrie 4.0 vorhandenen Literatur vorgestelltes Konzept mit sogenannten Fähigkeiten („Capabilities“) und Fertigkeiten („Skills“). Darin werden zunächst Prozesse möglichst lösungsunabhängig durch benötigte Fähigkeiten beschrieben. Auf der Gegenseite gibt es Ressourcen, welche diese Fähigkeiten bereitstellen und durch eine Implementierung, die als Skill oder Fertigkeit bezeichnet wird, ausführen. Hierbei ist es auch möglich, dass mehrere Ressourcen zusammen neue Funktionalitäten erlangen und diese als sogenannte Composite Skills ausführen. Eine grobe Übersicht zum Fähigkeitsmodell ist in Abbildung 8 zu sehen.

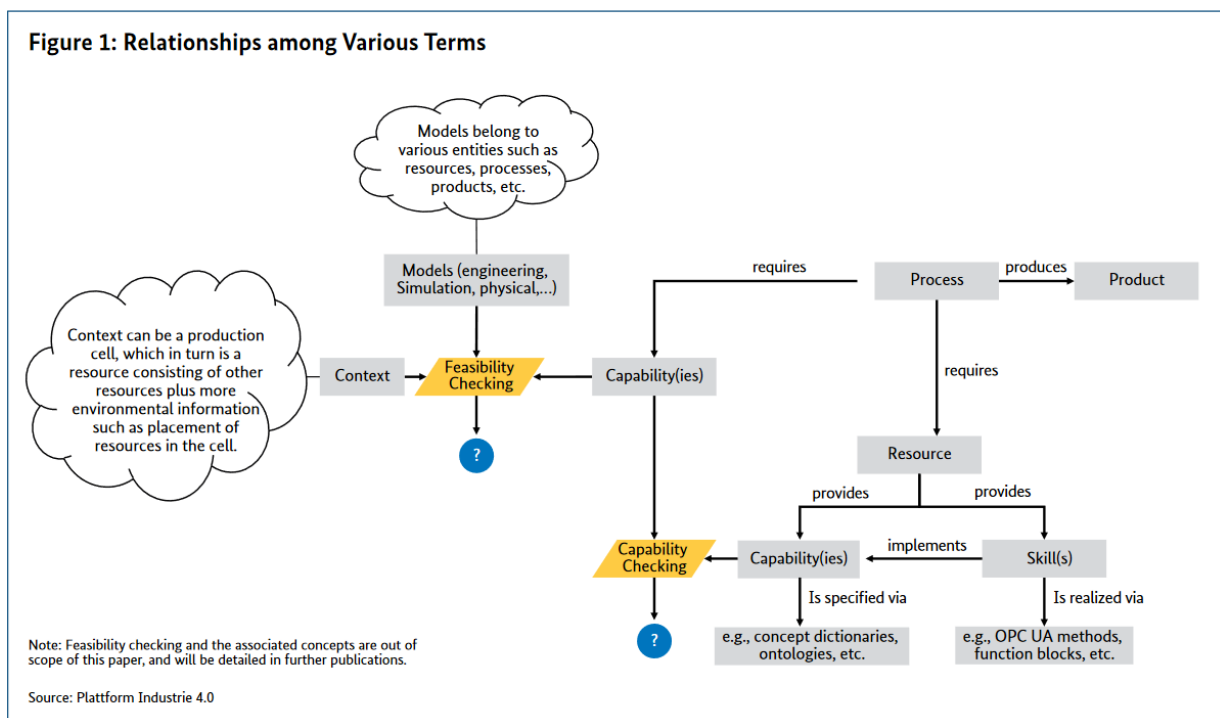


Abbildung 8: Fähigkeitskonzept der Plattform Industrie 4.0

In der Abbildung ist zu erkennen, dass die benötigten mit den durch die Ressourcen bereitgestellten Fähigkeiten durch sogenanntes Capability Checking abgeglichen werden müssen. Auf diese Weise können passende Ressourcen ausgewählt werden, welche die vorgegebenen Prozesse durchführen können. Damit dieses Matchmaking durchgeführt werden kann, werden Kenntnisse über die durchzuführenden Prozesse bzw. Tasks und den Ressourcen samt ihren Fähigkeiten benötigt. Mit dem ebenfalls dargestellten Feasibility Checking wird die Ausführbarkeit von Fähigkeiten an weitere, kontextabhängige Bedingungen geknüpft. In RoboCoop wurde dies zwar ansatzweise berücksichtigt, stellt aber nicht den Hauptfokus des Projekts dar. Vielmehr ist die Zielsetzung zunächst die maschinenlesbare Beschreibung der Fähigkeiten und Ressourcen sowie die funktionale Implementierung der Skills in den Ressourcen. Für das „Capability-Checking“ von benötigten und angebotenen Fähigkeiten („Capabilities“) nach dem bereits zuvor beschriebenen Fähigkeitskonzept

der Plattform Industrie 4.0 ist dementsprechend eine Ontologie zur Fähigkeitsbeschreibung notwendig, mit der die Verknüpfung hergestellt werden kann. Im RoboCoop-Projekt werden diese Informationen dateibasiert bereitgestellt, zukünftig wird aber auch eine datenbankbasierte Lösung mit entsprechenden Ontologie-Modellen angestrebt, bei denen die Informationen über Abfragen (Queries) bereitgestellt werden (z.B. SPARQL).

Die Struktur des im Projekt entwickelten Prozessmanagementsystems ist in Abbildung 9 dargestellt. Hauptschnittstelle stellt hier das Backend dar, welches eine API bietet, mit der Statusinformationen über die einzelnen Komponenten abgerufen werden können sowie neue Aufträge entgegengenommen werden können. Dafür wurde zusätzlich ein webbasiertes Frontend (Abbildung 10) entwickelt, das den Zustand der Prozesse und Ressourcen visualisiert und außerdem die Möglichkeit bietet über eine Eingabemaske neue Aufgaben an das Backend zu schicken und damit in Auftrag zu geben. Da in einigen Prozessen auch die Ressource „Werker“ vorgesehen ist, würde zudem eine zusätzliche Schnittstelle zur Bestätigung von manuellen Tätigkeiten eingebaut. Im Idealfall würde ein Werker die Fertigstellung von manuellen Tätigkeiten im Prozessablauf z.B. über ein Wearable oder mobiles Endgerät bestätigen, um so der Prozesssteuerung den Abschluss des Arbeitsschrittes mitzuteilen.

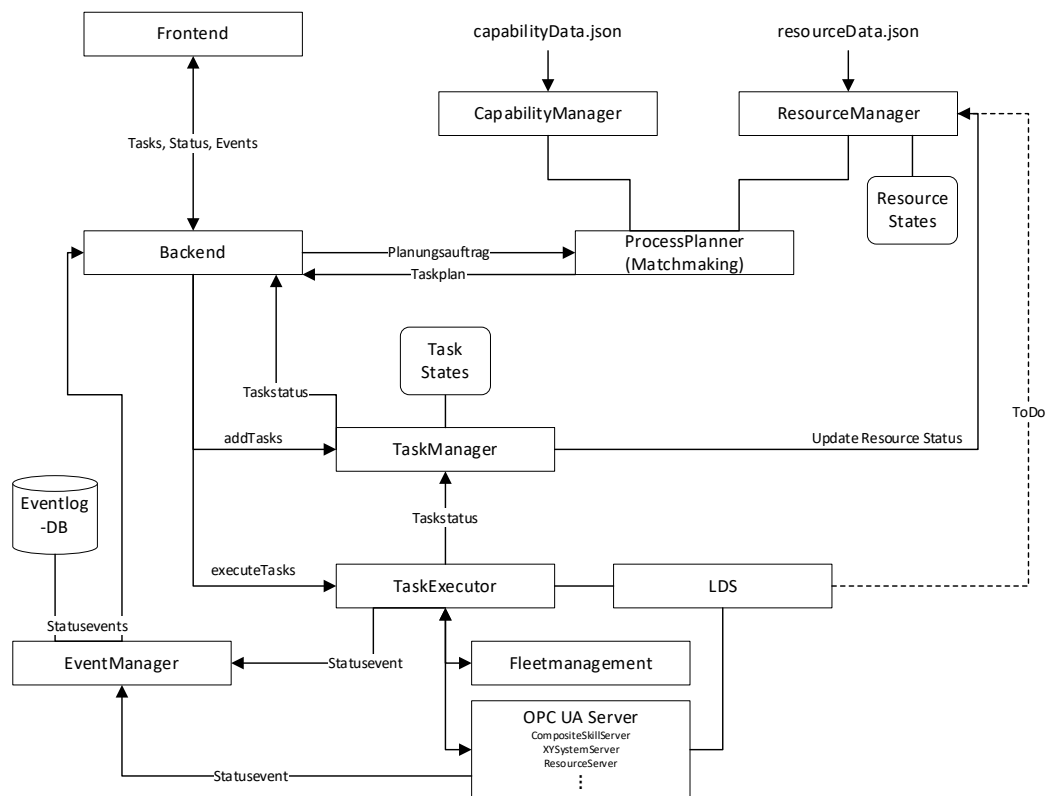


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Prozessmanagement-Architektur

Robocoop Dashboard Fraunhofer IFAM

Übersicht | Tasks | Ressourcen | Fleetmanager | Worker Interface | Eventlog

NEUE TASKS ERSTELLEN | TASKS AUSFÜHREN >

TaskID	Task Type	Location	Priority	Status
LoadWindowFrame_1	LoadWindowFrame	node1	1	Active

Task description:
Fensterrahmen aus dem Lager abholen

CarrierSystem (Assembly)
CarrierSystem_Ifam1

Process Step	Parameters	Priority	Status
ASSEMBLE	CarrierWorkModule: CarrierWorkModule_Ifam1 StandAloneModule: StandAloneModule_1	1.1	Completed
MOVE_TO	node1 @ 3DFrameGHI	1.2	Completed
WAIT_FOR_PROCESS_START		1.3	Completed
PROCESS		1.4	Active
CONVERT_TYPE	CarrierSystem-WF	1.5	Pending

Worker
Worker_Ifam1

Process Step	Parameters	Priority	Status
MOVE_TO	node1 @ 3DFrameJKL	1.1	Completed
WAIT_FOR_PROCESS_START		1.2	Completed
PROCESS		1.3	Active

TaskID	Task Type	Location	Priority	Status
PrepareWindowFrame_1	PrepareWindowFrame	node2	2	Pending

Task description:
Fensterrahmen-Vorbereitung am ausgelagerten Arbeitsplatz

CarrierSystem-WF
CarrierSystem_Ifam1

Abbildung 10: Frontend-Dashboard zur Visualisierung der Prozesse und Ressourcen

Um den tatsächlichen Zustand von Ressourcen und Aufgaben von der simulierten Vorausplanung zu kapseln, wurde der Prozessplaner in ein eigenständiges Modul ausgelagert. Dieser erstellt den Taskplan auf Basis der bereitgestellten Informationen über Fähigkeiten und Ressourcen. Die aktuell verfügbaren Fähigkeiten und Ressourcen werden über den Capability- bzw. Resource-Manager verwaltet. Der generierte Taskplan wird in einem Zwischenschritt über das Frontend zur Überprüfung angezeigt und noch einmal manuell bestätigt, bevor die enthaltenden neuen Aufgaben an den Task-Manager und den Task-Executor zur Ausführung geschickt werden. Über den Task-Manager werden dann die Skills (implementierte Fähigkeiten) der jeweiligen Ressourcen parametrisiert und aufgerufen. Aufgaben, an denen mehrere Ressourcen gleichzeitig beteiligt sind werden über einen „Composite OPC UA Server“ ausgeführt, der wiederum die untergeordneten Skills der beteiligten Ressourcen parametrisiert und ausführt. Je nach Art und Verfügbarkeit der benötigten Ressourcen sind Vorbereitungs- bzw. Nachbereitungsschritte notwendig. Viele Ressourcen bestehen aus mehreren Modulen, die zusammengesetzt werden müssen, bevor die Ressource einsatzbereit ist. Für diese sogenannten Assembly-Ressourcen führt der Task-Executor deshalb eine zusätzliche Funktion

„AssembleSystem“ aus, bevor die Hauptaufgabe gestartet wird. Die AssembleSystem-Funktion besteht wiederum aus mehreren Teilschritten, bei denen die einzelnen Module von ihren jeweiligen Ablagestationen abgeholt und an das System angedockt werden. Beispielsweise kann das Roboter-Arbeitsmodul zusammen mit dem Stand-Alone-Modul und einem Kleinbauteilgreifer („Small-Part-Gripper“) zum System *RobotSystem-SPGripper* zusammengesetzt werden. Zum Transport der Module werden entsprechende Aufträge an den Fleetmanager geschickt, der einzelne AGVs beauftragt.

Sobald die Ressourcen verfügbar bzw. zusammengesetzt sind, werden diese an den über den Prozess parametrisierten Einsatzort der Hauptaufgabe geschickt. Wenn alle für die Aufgabe benötigten Ressourcen bereit stehen, startet der Task-Executor den über OPC UA gesteuerten Prozessablauf durch Aufruf der jeweiligen Ressourcen-Skills.

Über die „Skill-State-Machine“ werden Statusänderungen sämtlicher Prozesse an die Prozesssteuerung zurückgegeben und zusätzlich über einen Event-Manager in einer Datenbank geloggt bzw. an das Frontend ausgegeben.

Die Zustandsänderungen werden zudem im Task-Manager und Ressourcen-Manager aktualisiert, d.h. dass z.B. nach Beendigung einer Aufgabe die Ressourcen wieder freigegeben werden und die Aufgabe als abgeschlossen markiert wird. Hierbei wird auch erfasst, wenn sich eine Eigenschaft der Ressource während eines Prozessschrittes ändert, z.B. ob ein Bauteilträgermodul beladen ist oder nicht, was für nachfolgende Schritte relevant ist.

Eine weitere Funktionalität, ist ein „Local Discovery Server“ (LDS). Auf diesem können sich Ressourcen registrieren, die über einen OPC UA Server und Skills verfügen. OPC UA Clients im Netzwerk können sich anschließend auf diese über die Ressourcen-ID verbinden und die angebotenen Skills auslesen, statt über fest konfigurierte Endpoints. Eine direkte Anbindung an den Ressourcen-Manager ist hier zumindest zukünftig angedacht.

Ein wesentlicher Entwicklungsschwerpunkt lag in der Integration der Prozessabläufe mit dem Flottenmanagement. Da insbesondere das Aufnehmen und Ablegen von Arbeitsmodulen in die Logistikprozesse mit integriert werden muss, ist hier eine koordinierte Ansteuerung der Geräte erforderlich.

Es besteht die Möglichkeit, Tasksequenzen an OpenRMF zu übermitteln, die aus mehreren einzelnen Tasks oder „Phasen“ bestehen. Für das Beispiel „AssembleSystem_CarrierSystem“ sieht die Tasksequenz wie folgt aus:

GoToPlace(node_Modulstation1)	# AGV wird zu Modulstation 1 geschickt
PerformAction(dock_Module)	# AGV startet Docking-Prozedur, um CarrierWork-Module1 von der Modulstation aufzunehmen
GoToPlace(node_SAMstation1)	# AGV wird zu SAMstation1 geschickt
PerformAction(dock_SAM)	# AGV startet Docking-Prozedur, um StandAloneModule1 aufzunehmen

Tabelle 1 Tasksequenz des "AssembleSystem_CarrierSystem"

Analog werden die Tasksequenzen zu den anderen Prozessschritten und Arbeitsmodulen aufgebaut. Zudem gibt es auch zum Ablegen der Module entsprechende Funktionen, die als Task bzw. Phase aufgerufen werden können. Diese Tasksequenzen können somit vom Prozessmanagement gemäß Taskplan an das Flottenmanagement zur Ausführung geschickt werden. Über die OpenRMF-Schnittstelle können aber auch Aufträge von anderen Clients erteilt werden, so z.B. manuell über ein Webinterface oder zu Testzwecken mittels eines Scripts.

Die Funktionen, die mobile Roboter ausführen können hängen vom Modell und der Implementierung ab. Zur Einbindung in OpenRMF müssen jedoch einige Standardfunktionen integriert sein, wie etwa die Anweisung *GoToPlace(node)*, mit der der Roboter zu einer bestimmten Node auf der Karte navigiert (die festgelegten Koordinaten entspricht). Über die Funktion *PerformAction(action)* können weitere, roboterspezifische Aktionen ausgelöst werden, die jedoch zunächst implementiert und über die Roboterschnittstelle bereitgestellt werden müssen. Da diese Steuerungs-API jedoch erst im Laufe des Projekts zu OpenRMF hinzugefügt wurde und im zunächst genutzten FreeFleet-Adapter nicht zur Verfügung stand, musste für die Neobotix AGVs eine neue Fleetadapter-Schnittstelle erstellt werden.

Die neu entwickelte Schnittstelle basiert auf einer REST-API, die mit der Python-Bibliothek FastAPI realisiert wurde. Hierfür wurde eine neue ROS2-Node erstellt, welche Daten von dem und zum ROS-System der Neobotix übermittelt und über verschiedene REST-API-Endpoints bereitstellt. Über diese Endpoints können Roboter-Position, Prozess- und Karteninformationen, Batteriezustand und weitere Informationen abgefragt werden sowie Fahraufträge, Prozessbefehle, Konfigurationen usw. geschickt werden. Zur Integration in OpenRMF wurde ein entsprechender neuer Fleetadapter mit den benötigten Funktionen erstellt, der mit der REST-API kommuniziert. Auch der Adapter für den Fahrstuhl zum Erreichen der zweiten Ebene am Kabinendemonstrator wurde überarbeitet, um die Zuverlässigkeit beim Bauteiltransport zu erhöhen.

6.3 HAP 2: Modularität mobiler Robotersysteme

Der Fokus des HAP 2 liegt in der Modularisierung von Produktionstechnologien. So wurden zur Erhöhung der Flexibilität der Montagetätigkeiten und der Ressourceneinsparung Technologiebausteine entwickelt, die sich unter Verwendung der in HAP 1 erstellten Lösungen zu einem auf die Aufgabe optimierten Gesamtsystem zusammensetzen lassen. Der Vorteil liegt darin Funktionalitäten unter Berücksichtigung von Verfügbarkeiten und Produktionsmerkmalen zu kombinieren. Zur Ermöglichung eines modularen Baukastens wurden in diesem HAP die notwendigen technologischen Voraussetzungen durchleuchtet und konzeptionell ausgearbeitet.

6.3.1 AP 2.1: Konzepterstellung eines modularen AGV-Systems

Dieser Abschnitt stellt die geleisteten Entwicklungen und Umsetzung modularisierter Fertigungstechnologien im Projekt RoboCoop dar. Hierfür wurden in diesem Arbeitspaket die Anforderungen an ein modulares, mobiles Robotersystem für den Einsatz innerhalb von Flugzeugstrukturen sowie den Vorfeldbereichen der Flugzeugfertigung definiert und auf deren Grundlage Konzepte zur Ausgestaltung der Modularität erstellt. In Abbildung 11 ist das grundlegende Konzept einer modularen, mobilen Produktionseinheit dargestellt. Die einzelnen Komponenten Arbeitsmodul, Stand-Alone-Modul (SAM) und Automated Guided Vehicles (AGV) werden über Kupplungssysteme mit einander verbunden und bilden zusammen das Gesamtsystem. Die Kupplungen stellen die bereits im Kapitel 6.2.1 AP 1.1: Definition von Hard-/Softwareschnittstellen und Standards definierten, erforderlichen Hardwareschnittstellen zwischen den einzelnen Modulen dar und dienen der Kraftkupplung, der Medienübertragung und dem Referenzieren der Module untereinander.

Die Vorteile des Konzeptes liegen in einer hohen Auslastung der Hardwarekomponenten, der Unabhängigkeit von verschiedenen Herstellern und schafft aufgrund der freien Kombination der diversen Module eine Flexibilität in den auszuführenden Prozessen.

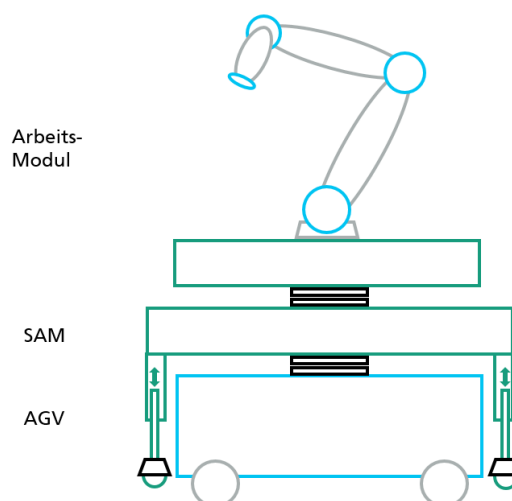


Abbildung 11 modularer Aufbau einer mobilen Produktionseinheit

Zur Realisierung wurden die wichtigsten Anforderungen an ein solches Systems in notwendige Funktionalitäten heruntergebrochen. Für jede dieser Elementarfunktionen wurden verschiedene Hardwarevarianten erarbeitet, analysiert und anschließend als Demonstratoren ausgestaltet.

Kupplung zwischen AGV und Arbeitsmodulen

Damit sich das Gesamtsystem für die Aufgabe flexibel zusammensetzen lässt, muss eine mechanische Schnittstelle zwischen dem AGV und dem Arbeitsmodul geben. Hierfür wurde nach fertigen Lösungen geschaut.

Am Markt erhältliche Kupplung für Industrieroboter zur Aufnahme von Endeffektoren sind entsprechend für den Einsatz mit hohen Lasten ausgelegt und besitzen herstellerseitig bereits Medienführung und eine hohe mechanische Steifigkeit. Nachteilig ist jedoch der große Bauraum, der aufgrund des Einsatzes eines Fest- und eines Loseils benötigt wird. Zudem besitzen die Kupplungselemente wegen ihres eigentlichen Einsatzzwecks und der hohen Steifigkeit ein hohes Eigengewicht, welches die Traglast des AGV mindern würde.

Zur Verringerung des Gewichts wurden die mechanische Kupplung und die Medienversorgung in separaten Systemen unterteilt und ebenfalls als fertige Einzellösungen gesucht. Lediglich die Kupplung der Medienversorgung ließe sich über Industriekupplungselemente realisieren, welche für einen automatisierten Prozess jedoch keine ausreichende Zuverlässigkeit bieten.

Aus diesem Grund musste letztendlich eine Eigenkonstruktion, welche entsprechend der gewünschten Anforderungen umgesetzt werden. Die detaillierte Darstellung der Umsetzung ist in Kapitel 6.3.2 beschrieben.

Kupplung zwischen SAM und Arbeitsmodulen

Die mechanische Schnittstelle zum SAM hat äquivalente Anforderungen wie die zwischen AGV und Arbeitsmodul. Hier ist insbesondere zu erwähnen, dass eine Kupplung von einem Arbeitsmodul und einem SAM ein Duplikation der gewählten Lösung im vorigen Abschnitt bedeutet und zu einer doppelten Aufbauhöhe führt. Lösung hierfür könnte ein örtlicher Versatz der Kupplungen sein, um die Aufbauhöhe beim Zwischenbau des SAM zu reduzieren. Darüber hinaus würde eine Anschlussorientierung des SAM keinen zusätzlichen Aufbau in der Höhe erzeugen, allerdings den Footprint des Gesamtsystems erhöhen, welcher zu weiteren Herausforderungen führen kann.

Toleranzausgleich zwischen den Kupplungsseiten

Bei der Ankopplung der verschiedenen Systeme wird ein Positionierungsfehler der Module zueinander unvermeidbar sein. Die identifizierten Möglichkeiten lassen sich in zwei Kategorien unterteilen: passiver Toleranzausgleich, welcher mechanisch durch die Annäherung erfolgt, oder aktiver Toleranzausgleich, der durch ein Sensorfeedback den initialen Positionierungsfehler korrigiert.

Positionsverbesserung des AGV (optional)

Dieser Punkt erleichtert die Anforderungen aus dem vorangegangenen Tabellenpunkt, ist jedoch nicht zwingend notwendig. Je besser die zu Erwartende Positionierung, desto kleiner können die mechanischen Toleranzausgleichssysteme ausfallen.

Hub / Dockingmöglichkeit

Zur automatisierten Aufnahme von Arbeitsmodulen, die in einer geeigneten Aufnahme bereitgestellt werden, ist es erforderlich einen Hub auszuführen. Die Hubfunktion ist dabei durch das AGV zu gewährleisten. Nach dem Herausheben des Arbeitsmoduls aus der Ablage ist die Verbindung zwischen AGV und Arbeitsmodul herzustellen. Denkbar ist auch die Nutzung der Hubfunktion in weiteren Situationen, wie zum Beispiel zur Erhöhung der Reichweite.

Lasersensoren freigeben

Für die Fahrt mit dem AGV ist die Freigabe des Laserscanners notwendig, da dieser das Umfeld auf potenzielle Hindernisse untersucht. Die Laserscanner arbeiten nach einem rotatorischen Abstandsmessprinzip, bei welchem die Distanz zum nächstgelegenen Hindernis in den vom Scanner sichtbaren Bereichen aufgezeichnet wird. In der Höhe des Scanners dürfen nahe des AGVs keine Hindernisse hineinragen, da sonst entweder der Sichtbereich eingeschränkt oder eine Bewegung des Fahrzeugs nicht möglich ist.

Aus den einzelnen Funktionsvarianten wurden unterschiedliche Gesamtsysteme zusammengestellt und die Konfiguration auf Konsistenz in Bezug auf die in AP 1.1 aufgestellten Anforderungen geprüft. Dieser Schritt ist notwendig, da einige der Bedingungen in Relation zueinander stehen und sich begünstigen können, keinen Einfluss aufeinander haben oder sogar ausschließen. So sind 4 Konzepte entstanden, die sich als plausibel und in sich konsistent gezeigt haben. Diese sind in der folgenden Tabelle 2 dargestellt.

Das Hauptkriterium für die Auswahl der Konfigurationen ist das Hubsystem. Dabei können die 3 Systeme AGV, Ablagestation und SAM mit einer Hubeinheit ausgestattet sein. Zusätzlich kann beim SAM noch differenziert werden, zwischen einem schwachen Hub, der nur in der Lage ist die Beine unbelastet ein- und auszufahren und einem leistungsstarken Lift, der auch ein gekoppeltes Arbeitsmodul anheben kann um den An- oder Abkopplungsprozess zum AGV zu gewährleisten.

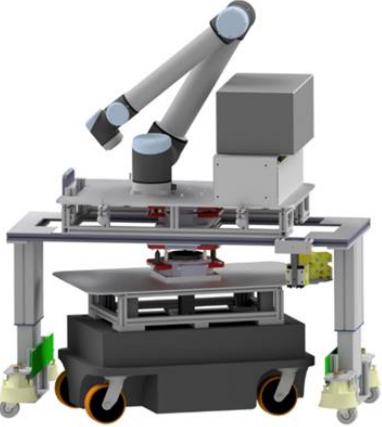
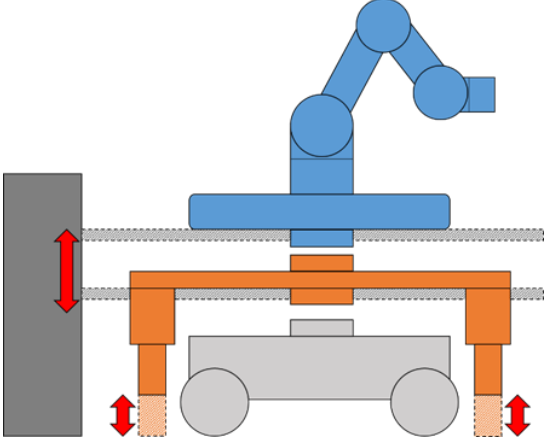

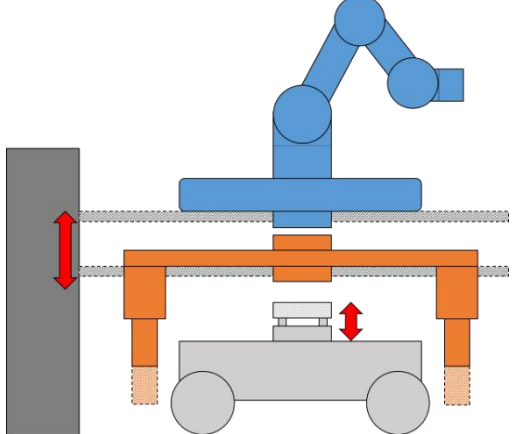
<p>Konzept 1 zweistufiger AGV Hub</p> <p>Ablagestation passiv AGV zweistufig (mit / ohne SAM) SAM als Zwischenbaumodul</p>	
<p>Konzept 2 Hubloses AGV</p> <p>Ablagestation mehrstufig (mit / ohne SAM) AGV ohne Hub SAM einstufig</p>	
<p>Konzept 3 steckbare Stand-Alone-Beine</p> <p>Ablagestation passiv AGV einstufig SAM seitlich steckbar</p>	
<p>Konzept 4 schwaches SAM</p> <p>Ablagestation mehrstufig AGV einstufig SAM nur unbelastetes Ein-/Ausfahren</p>	

Tabelle 2: Systementwürfe aus der Konzeptphase

Die entwickelten Konzepte durchliefen mehrere Entwicklungsrounds in denen die unterschiedlichen Systeme analysiert und deren Vor- und Nachteile identifiziert und dokumentiert wurden. In den Entwicklungsprozess war auch Airbus als potenzieller Endanwender des modularen Robotersystems mit eingebunden um die Anforderungen an das Gesamtsystem mit zu definieren. Aus den Diskussionsrunden wurden High-Level Anforderungen an das modulare Konzept abgeleitet und mit den Eigenschaften der vier unterschiedlichen Systemkonfigurationen abgeglichen.

Die Entscheidung für das Konzept „steckbare SAM-Beine“ ist maßgeblich darin begründet, dass durch die seitlichen Ankopplung (gegenüber der vertikalen Einbindung) der Stand-Alone-Beine keine weitere Aufbauhöhe für das Gesamtsystem eingebracht wird. Dadurch wird der Schwerpunkt niedrig gehalten, was die Kippstabilität des Systems erhöht. Außerdem kann durch die steckbaren und ausfahrbaren Beine die Aufstandsfläche bei Bedarf vergrößert werden, wodurch die Stabilität weiter erhöht werden kann und zusätzlich auch AGVs mit einem Ackermannantrieb in der Lage sind das im Feld platzierte Modul wieder zu verlassen. Ein weiterer Vorteil ergibt sich für das Hubsystem, da nur noch eine feste Kopplungshöhe von AGV zu Arbeitsmodul besteht und somit das Ablagesystem passiv ausgeführt werden kann. Nur ein leistungsstarker Hub auf dem AGV befähigt das gesamte Konzept seine Funktionen erfüllen zu können. Somit können die meisten Komponenten mit einem geringen Anteil an teurer und aufwendiger Messtechnik und Aktuatorik auskommen, wodurch die Wirtschaftlichkeit des Systems begünstigt wird.

Die folgende Darstellung zeigt das gewählte Konzept „steckbare SAM-Beine“ in einer Übersichtsdarstellung.



Abbildung 12: Übersicht modulares Konzept 'steckbare Stand-Alone-Beine'

Vorteile

- Nur ein leistungsstarkes Hubsystem mit geringem Hub wird benötigt
- AGV mit Ackermann Antrieb können gerade einfahren, da die Beine breitenverstellbar sind und für den Transport wieder schmaler eingestellt werden können
- Größere Standfestigkeit durch breitere Beine im abgestellten Zustand
- Geringere Aufbauhöhe, da die Beine seitlich angekoppelt werden, anstatt einer zusätzlichen Ebene in vertikaler Richtung
- Toleranzausgleich in horizontaler Ebene, die Einfahrt des AGV in ein Schienensystem kann zu Positionskorrektur genutzt werden
- Hub des SAMs muss nur unbelastet verfahren
- Keine zusätzliche Navigations / Safety Sensorik nötig, da die Beine einfahrbar sind und die Scannerebene freigeben können

Nachteile

- Es wird eine eigene Ablagestation für SAMs benötigt

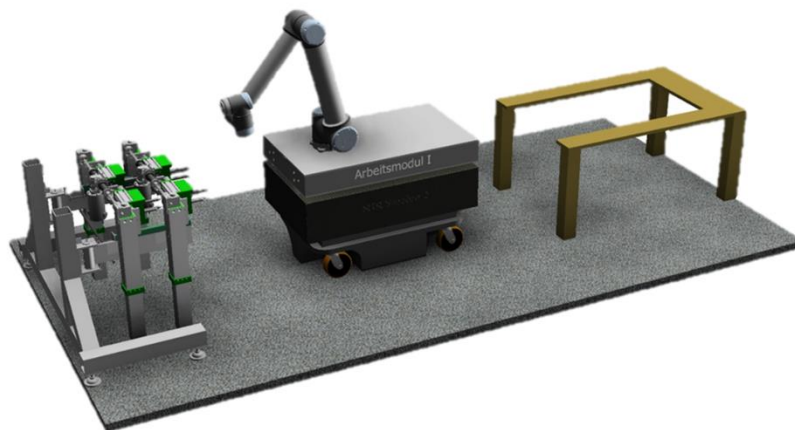


Abbildung 13: modulares Gesamtsystem RoboCoop

Die obige Grafik zeigt einen Überblick über verschiedene Komponenten des Gesamtsystems. Zentral dargestellt ist die Arbeitseinheit bestehend aus AGV mit Lift, darauf ist das Roboterarbeitsmodul ausgerüstet, welches aus der rechts dargestellten Ablagestation für Arbeitsmodule entnommen wurde. Links im Bild ist die Ablagestation für die Stand-Alone-Beine dargestellt. Aus dieser kann sich das AGV bei Bedarf die steckbaren SAM-Beine an das Arbeitsmodul durch Einfahren ankopeln. Dieses Feature wird dem Arbeitsmodul nur bei Bedarf nachgerüstet und kann vollautomatisch an- und abgedockt werden.

Entwicklung der Hardwarekomponenten

Nachdem das grundlegende Konzept der Modularität entwickelt und die von den Modulen zu erfüllenden Funktionalitäten definiert wurden, wurden die jeweiligen Hardwarekomponenten ausgestaltet.

AGV und Lift

Zur Umsetzung des Modularitätsgedanken sieht das Konzept vor, AGVs mit einem Lift auszustatten. Dieser ermöglicht es dem AGV unterschiedliche Arbeitsmodule aufzunehmen und sich mechanisch mit diesen zu verbinden. Eine Durchführung elektrischer Signale oder anderer Medien ist im Konzept nicht mehr vorgesehen. Unter Zielstellung einer möglichst großen Unabhängigkeit der Arbeitsmodule und der besseren Generik und Erweiterbarkeit in den elektrischen Schnittstellen wurden die Arbeitsmodule mit einer eigenen Energieversorgung ausgestattet und ein drahtloses Netz des Projektpartners wireless.consulting zur Kommunikation zwischen den Modulen verwendet. So sind die Systeme beim Signalaustausch nicht auf die Möglichkeiten eines Steckkontaktes zwischen AGV und Arbeitsmodul begrenzt.

Weiterhin wurde mit Hilfe des Liftes eine einheitliche Hardwareschnittstelle oberhalb der AGVs geschaffen. Die Lift Höhe wird an das jeweilige AGV angepasst, sodass die Gesamthöhe von AGV und Lift immer dieselbe ist. Dadurch wird das Koppeln von Arbeitsmodulen aus einheitlichen Ablagestationen ermöglicht und die größtmögliche Kombinationsmöglichkeit aus AGV und Arbeitsmodul erreicht.

Für die Umsetzung des Hubs standen mehrere Konzepte zur Wahl. Neben dem ausgewählten Konzept des Spindelhubes standen die Möglichkeiten eines Scherenhubs sowie pneumatische Ansätze. Mit Hilfe von Erfahrungen aus vorherigen Projekten hat sich das Konzept des Spindelhubes als am besten für die Anwendung erwiesen. Ein Ziel war es im Gesamtsystem möglichst auf den Einsatz von Pneumatik zu verzichten und stattdessen auf elektrische Aktuatorik zu setzen. Dies führt zu einer effektiveren Nutzung der Energie und damit kleineren und leichteren Speichern in dem mobilen System. Weiterhin lässt sich das System des Spindelhubes über entsprechende Getriebe mechanisch synchronisieren. So wird das System von einem Elektromotor angetrieben und die Kraft mittels Kegelradgetriebe auf vier Spindelhubgetriebe verteilt.

Als mechanische Schnittstelle zum Arbeitsmodul dienen „T-Köpfe“, die auf den Spindeln montiert sind. Diese werden horizontal in eine C-Schiene eingeführt und ziehen diese auf die Oberfläche des Liftes.

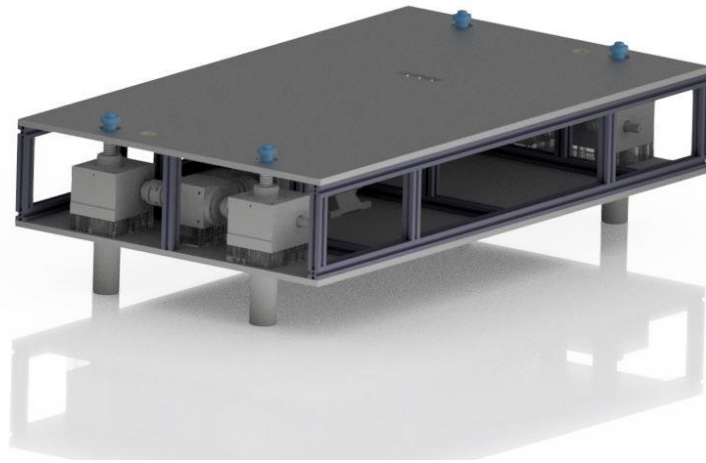


Abbildung 14: Lift

Nachteil des Konzeptes des Spindelhubes ist die Bauhöhe der Spindelhubgetriebe. So ragen die Getriebe wie in Abbildung 14 zu sehen weit nach unten aus dem Lift heraus. Dadurch muss der Lift in der Länge größer sein als das AGV, sodass die Getriebe vor bzw. hinter dem AGV Platz finden.

Das Hubsystem wird in eine Konstruktion aus Aluminium Profilen und Platten eingehaust. Dies dient sowohl dem Schutz vor Umwelteinflüssen als auch dem Schutz vor Berührung der beweglichen Teile. Weiterhin dient das Gehäuse der Weiterleitung der Kräfte und Momente aus dem Arbeitsmodul in das AGV. Dazu wurden die Profile nach einer ausgiebigen FEM-Analyse entsprechend positioniert und mit Platten verstärkt.

Arbeitsmodul Roboter

Das Robotermodul besteht aus einem standardisierten Modulaufbau, auf welchem ein Leichtbauroboter des Typs UR10 montiert ist. Im Inneren des Moduls sind die Batterie und das Steuergerät des UR10 untergebracht. Außerdem wurde der Bereich direkt unterhalb des Roboters verstärkt, damit sich das Arbeitsmodul nicht verformen und der Roboter die gewünschte Genauigkeit erreichen kann.

Für diese Versteifung werden 5 mm starke Bleche unterhalb des Roboters angebracht, welche mit Profilstreben quer zu dem Außengestell verbunden werden. Eine FEM hat ergeben, dass damit eine Verschiebung bei maximalen Kräften von 0,072 mm nach unten erreicht wird. Diese Verschiebung führt zu einer maximalen Verschiebung von 1,248 mm am Roboterflansch, wenn der Roboter voll ausgefahren ist.

Der Roboter wurde auf dem Modul so positioniert, dass er eine möglichst große Reichweite und Arbeitsbereich hat. Aus diesem Grund ist der Roboter nicht mittig, sondern zu einer Seite versetzt montiert. Dadurch wird eine bevorzugte Arbeitsrichtung geschaffen, ermöglicht aber auch das Arbeiten unterhalb der Moduloberkante in Bodennähe. Die Position des Roboters auf dem Modul ist in Abbildung 15 dargestellt.

Damit der Leichtbauroboter betrieben werden kann, in in das Robotermodul eine Batterie und ein Steuergerät verbaut. Die Batterie ist eine Lithium-Eisen-Phosphat Batterie mit einer Kapazität von 60 Ah. Diese Art der Batterie hat den Vorteil, dass sie weniger schlagempfindlich ist, mehr Ladezyklen durchlaufen kann, keine bevorzugte Einbaurichtung aufweist und ein gutes Leistung-Gewichtsverhältnis aufweist. Das Steuergerät des Roboters passt in dem, vom Hersteller gewählten, Zusammenbau nicht in das Arbeitsmodul. Daher wurde das Steuergerät in seine Einzelkomponenten zerlegt, sodass es in das Modul passt, ohne das ein Aufbau auf dem Modul nötig ist. Der neue Zusammenbau des Steuergeräts muss mit zwei Lüftern unterstützt werden, da der Lüfter des Steuergeräts nicht bei den anderen Komponenten mit verbaut werden kann. Das liegt daran, dass dieser zu groß ist und daher unter der Deckplatte verschraubt werden muss.



Abbildung 15: Arbeitsmodul Roboter

Das Robotermodul besitzt, genau wie jedes andere Arbeitsmodul, eine Möglichkeit zu erkennen, auf welchem AGV es gerade transportiert wird. Um dies umzusetzen gibt es verschiedene Möglichkeiten, die alle Vor- und Nachteile mit sich bringen. Als Konzepte wurden dazu QR-Codes, Bar-Codes, RFID und eine Pin-Codierung betrachtet. QR-Codes zeichnen sich dadurch aus, dass sie schnell und leicht umgesetzt werden können, darüber hinaus ist für das Erkennen und Lesen nicht eine exakte Position notwendig, sondern das System besitzt einen gewissen Toleranzbereich. Der Nachteil bei diesem ist allerdings, dass der QR-Code frei von Schmutz sein muss und kaum Beschädigung aufweisen darf. Auch muss der Code eine gewisse Größe haben, um ein Lesen zu erleichtern. Ähnliche Kriterien treffen auch auf den Bar-Code zu, nur mit dem Zusatz, dass dieser ein

geringeres Speichervolumen hat. RFID steht für Radio Frequency Identification und ermöglicht einen Austausch zwischen einem aktiven Lesegerät und einem passiven Transponder. Dieser Transponder kann dabei frei programmiert werden, hat nur eine kleine Größe, ermöglicht eine hohe Datenübertragung und die Daten können schnell ausgelesen werden. Allerdings erfordert dieses Konzept auch einen höheren Programmieraufwand und auch die Reichweite ist dabei auf wenige Zentimeter begrenzt. Eine Pin-Codierung ermöglicht eine zuverlässige Erkennung des Moduls und kann bei entsprechender Auslegung auch relativ stabil verbaut sein, sodass ein Stoß oder Schlag dieses Konzept nicht oder nur geringfügig beschädigen würde. Allerdings ist für die Pin-Codierung eine genaue Positionierung nötig, damit das richtige Signal ausgegeben wird. Dazu muss es gegebenenfalls symmetrisch aufgebaut werden, damit es keine Konflikte bei der Erkennung gibt. Dadurch ist die Anzahl der möglichen Kombinationen und damit die Anzahl der möglichen Module begrenzt.

Am überzeugendsten ist die Erkennung mittels RFID, da diese eine hohe Flexibilität aufweist und vielseitig eingesetzt werden kann. Zudem weist es wenige Störungen auf und es werden auch bei einer größeren Toleranz noch Daten zuverlässig ausgetauscht. Weiterhin ist die Skalierung auf Systeme mit vielen Teilnehmern ohne Probleme möglich.

Arbeitsmodul Bauteiltransport

Dieses Arbeitsmodul wird in zwei Grundkonzepte unterteilt, da zum einen Großbauteile in Form von einer Sitzbank oder eines Hatracks aber auch kleinere Komponenten wie Fensterrahmen oder Werkzeuge transportiert werden können.

Das Bauteilaufnahmemodul für die Großbauteile ist dabei so ausgelegt, dass 2 AGVs in Formation fahren und das Bauteil transportieren. Die Bauteilaufnahme wurde so ausgelegt, dass die Toleranz zwischen den beiden AGVs ausgeglichen und mit demselben Aufbau sowohl ein Hatrack als auch eine Sitzbank transportiert werden kann. Dieser Aufbau ist in Abbildung 16 veranschaulicht. Damit die AGVs sich frei voneinander bewegen und drehen können ist die Bauteilaufnahme mit einer Kunststofffläche auf der Unterseite versehen, so kann diese auf dem Arbeitsmodul gleiten. Für den Toleranzausgleich wird ein Dorn auf der Unterseite der Bauteilaufnahme montiert, der in ein entsprechendes Gegenstück im Arbeitsmodul passt. Dadurch ist es möglich, dass die AGVs bis zu einem gewissen Grad von dem Weg abweichen können ohne dass es zu einem Ausfall kommt. Für die Bauteilaufnahme ist es wichtig, dass sie so gestaltet wird, dass sowohl die Sitzreihe als auch das Hatrack aufgenommen werden können. Die Umsetzung ist dahingehend schwieriger, dass die Sitzreihe und das Hatrack unterschiedliche Aufnahmen benötigen.

Für den Transport von Kleinbauteilen wird nur ein AGV benötigt, sodass der Bauteilträger mit dem System des Toleranzausgleiches entfallen kann. Für diesen Anwendungsfall ist es ausreichend ein System zur Aufnahme der Bauteile bzw. des Werkzeuge auf dem Arbeitsmodul zu integrieren. Dies kann beispielsweise in Form von einer Aufnahmemöglichkeit von standardisierten Euroboxen umgesetzt werden in denen mit Hilfe von Shadowboards positionsgenau kleine Bauteile transportiert werden können.

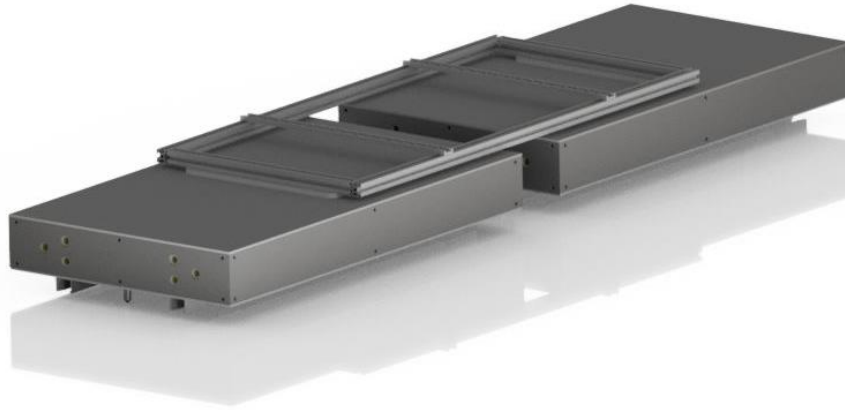


Abbildung 16: Bauteilaufnahme Großbauteil

Stand-Alone-Modul

Beim Konzept des Stand-Alone-Moduls fiel die Entscheidung, wie bereits oben beschrieben, auf die Entwicklung von zwei Beinpaaren, die seitlich an das Arbeitsmodul angesteckt werden können. Entgegen der ursprünglichen Idee eines Zwischenmoduls zwischen AGV und Arbeitsmodul bietet dieses Konzept entscheidende Vorteile. So wird die Bauhöhe des Gesamtsystems durch den Wegfall des Zwischenmoduls deutlich verringert. Auch der Hub des Liftes kann deutlich geringer ausfallen, da die Beinpaare in horizontaler Richtung gekoppelt werden. Dies kommt wiederum dem gewählten Liftsystem des Spindelhubes zu Gute. Durch die Entscheidung für zwei einzelne Beinpaare wird es allerdings erforderlich eine Ablagemöglichkeit für diese zu schaffen.

Die umfangreichen Anforderungen an das SAM erfordern eine komplette Eigenkonstruktion. So müssen auf kleinem Raum die Funktionen der Seitenverstellung sowie der Höhenverstellung der Beine umgesetzt werden. Weiterhin muss der Kupplungsmechanismus integriert werden und ein Toleranzausgleich gegeben sein. Der aktuelle Stand der Konstruktion ist in Abbildung 17 zu sehen.

Zur Kupplung der SAM an das Arbeitsmodul dienen drei Aluminiumstifte. Diese werden mittels einer horizontalen Kupplungsbewegung in entsprechende Gleitbuchsen im Arbeitsmodul eingeführt und dort durch Magnetschnapper verriegelt. Zum Toleranzausgleich zwischen dem mobilen System und dem SAM während des Kupplungsvorgangs besitzen die Aluminiumstifte einen Konus.

Die Breitenverstellung der Beine ermöglicht das frontale Ein- und Ausfahren des AGV wenn ein Arbeitsmodul mit dem SAM abgestellt wird. Um dies zu erreichen wurde eine Linearführung aus Aluminiumprofilen konstruiert. Diese führt die Beine und nimmt die auftretenden Kräfte und Momente auf. Als Gleitlager dienen dabei Führungen aus S-Grün Kunststoff. Die seitliche Bewegung wird durch zwei Spindelmotoren erzeugt, die platzsparend zwischen den Beinen montiert sind. Eine synchrone Bewegung der beiden Beine ist nicht notwendig und wird nur rudimentär durch die parallele Ansteuerung der Motoren erreicht.

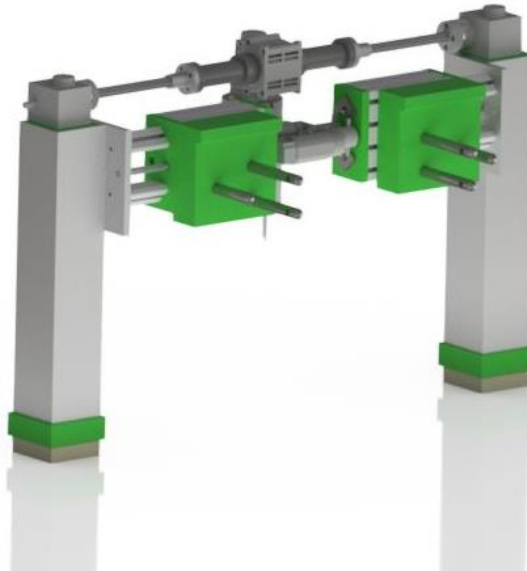


Abbildung 17: Stand-Alone-Modul

Um während der Fahrt des AGV den Sichtbereich der Laserscanner frei zu halten ist es notwendig einen großen Hub in die Beine zu integrieren. So sieht das Konzept vor die Beine um 200 mm einfahren zu können. Dies erfolgt durch zwei Spindelhubgetriebe, die am oberen Ende der Beine sitzen und durch die Spindelbewegung die Teleskopbeine Ein- bzw. Ausfahren. Der Teleskopmechanismus besteht aus zwei unterschiedlich großen Aluminium Vierkantrohren mit Gleitführungen aus S-Grün Kunststoff. Die Drehbewegung eines Elektromotors wird mechanisch synchronisiert über ein Getriebe auf beide Beine übertragen. Das System ist so ausgelegt, dass die Teleskopbewegung nur ohne Last erfolgen kann. Das bedeutet, dass das Arbeitsmodul mittels des AGV-Liftes angehoben wird, sodass es keine Belastung mehr erfährt, die Beine ausgefahren werden und das Arbeitsmodul wieder abgelassen wird. Im Stillstand wird der Motor durch eine Federkraftbremse gebremst und mit Hilfe der Selbsthemmung der Spindelhubgetriebe ist das System in der Lage alle auftretenden Kräfte und Momente aufzunehmen. Durch diese Entscheidung ist es aber erst möglich den Bauraum sowie die benötigte Energie der Motoren so gering zu halten.

Um die SAM automatisiert aufnehmen und ablegen zu können war es notwendig eine Ablagestation für diese zu entwickeln. In Abbildung 18 ist das erste Konzept einer solchen zu sehen. Dabei können zwei SAM hintereinander in die grünen Schienen abgelegt werden. Herausforderung hierbei ist der Toleranzausgleich in seitlicher sowie in Stoßrichtung. Hierfür wurden die Aufnahmeschienen drehbar gelagert und mittels Stange für eine parallele Lage gesorgt. Der Ausgleich in Stoßrichtung soll über ein gefedertes System erfolgen, was zur Zeit entwickelt wird.

Ein erster Prototyp des SAM wurde bereits aufgebaut und es folgen Versuche zur Kupplung mit dem Arbeitsmodul sowie zur Steifigkeit der seitlichen Verstellung und der Höhenverstellung.

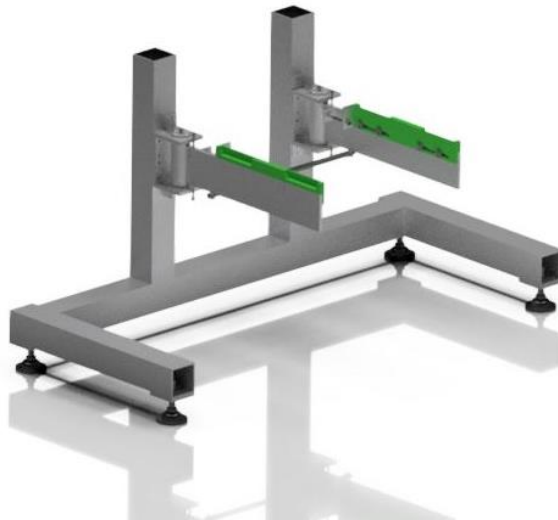


Abbildung 18: Ablagestation für ein Stand-Alone-Modul

Ablagestation Arbeitsmodul

Die Modul-Ablagestation wurde so gestaltet, dass jedes Modul darauf abgelegt werden kann und es keine Sonderfälle gibt. Das Modul muss in dieser Ablagestation immer auf einer vordefinierten Position liegen, damit das AGV dieses zuverlässig aufnehmen kann. Um diese Position zu erreichen muss die Ablagestation in der Lage sein Ungenauigkeiten beim Ablegen auszugleichen. Dieser Toleranzausgleich soll dabei möglichst Energielos erfolgen, damit die Ablagestation flexibel einsetzbar ist und keine Strom oder Druckluftversorgung am Einsatzort nötig ist. Für einen energielosen Toleranzausgleich sind verschiedene Konzepte vorstellbar.

Mögliche Konzepte sind ein Ausgleich über Druckfedern an der Seite der Station welche das Modul in die Ausgangsposition zurück drücken. Bei diesem Konzept ist eine hohe Genauigkeit und Zuverlässigkeit möglich. Allerdings ist das Konzept mit einem gewissen Fertigungsaufwand verbunden, da die Federn geführt werden müssen, damit sie auch in die gewünschte Richtung federn. Außerdem müssten diese Federn auch an einem Blech befestigt werden, welches als Kontaktfläche zwischen der Feder und dem Modul agiert. Ein anderes Konzept sieht vor eine Blattfeder zu verwenden, die eingedrückt wird und zum Toleranzausgleich ihre entspannte Form wieder annimmt. Vorteil ist auch hier die hohe Genauigkeit, mit der die Blattfeder das Modul in Position bringt. Auch die Zuverlässigkeit bei diesem Konzept ist sehr hoch, da die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Feder unerwartet verformt oder ausweicht sehr gering ist. Bei diesem Konzept ist allerdings die Frage, nach den Kräfte, welche eine Blattfeder aufbringen kann und ob diese Kraft ausreicht um das Modul zu bewegen. Eine weitere Möglichkeit wäre es, dass Modul in eine Senkung abzusetzen, in die das Modul hineineinfällt und somit die Ausgangsposition erreicht wird. Dieses Konzept hat das Problem, dass es einen hohen Fertigungsaufwand hat, da das Blech, in das das Modul abgelegt wird, mehrfach gebogen werden müsste. Dazu kommt, dass der Toleranzausgleich durch die Höhe der Senkung begrenzt ist. Allerdings wird mit diesem Prinzip die höchste Genauigkeit erreicht, da das Modul in eine Passform fällt, welche auch mit der höchsten Zuverlässigkeit erreicht werden kann, vorausgesetzt das Modul wird nicht extrem schief in die Ablagestation gelegt. Zum Vergleich wird auch ein pneumatisches System als Energie basiertes System betrachtet. Dieses bietet durch Hubzylinder eine hohe Präzision bei der Positionierung und auch eine hohe Zuverlässigkeit. Allerdings bedeutet dieses System auch einen höheren Fertigungsaufwand, da Zylinder an das Modul

angebracht werden müssten, die Ablagestation mit externen Medien, wie zum Beispiel Druckluft versorgt werden muss und auch eine programmierbare Steuerung für die Zylinder nötig wäre.

Als erfolgversprechendsten hat sich das Konzept mit den Blattfedern herausgestellt, da mit diesem Konzept eine hohe Genauigkeit erreicht werden kann und auch der Fertigungsaufwand überschaubar ist. Um die benötigten Kräfte bei dem Toleranzausgleich möglichst gering zu halten, wurden Kugelrollen auf der Tischplatte angebracht. Das Konzept mit den Blattfedern ist in Abbildung 19 dargestellt. Hier sind auch gut die Kugelrollen zu erkennen, die an der Tischplatte angebracht sind.



Abbildung 19: Ablagemodul

Entwicklung des Steuerungskonzept der Arbeitsmodule

Das Steuerungskonzept baut auf dem im vorherigen Abschnitt erläuterten Hardwaredesign auf. Das Arbeitsmodul selbst übernimmt dabei die zentrale Rolle und bietet die Interfaces zu den anderen Systemkomponenten an.

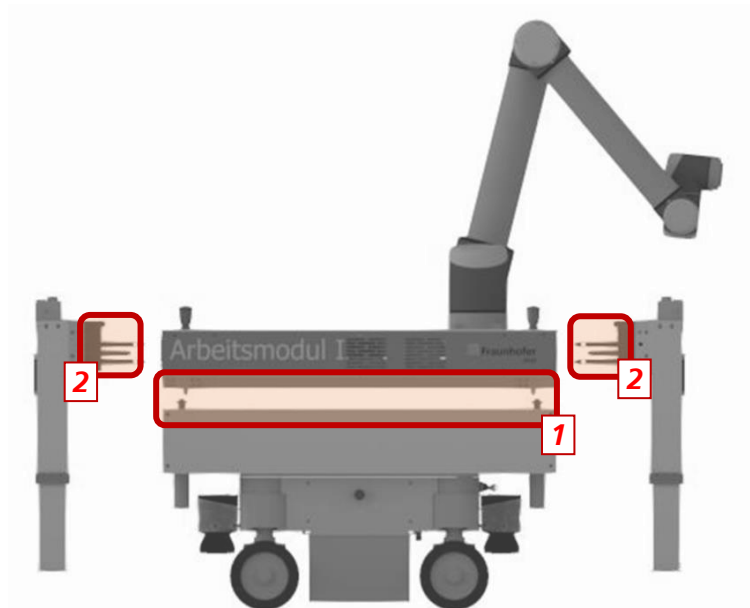


Abbildung 20: Übersicht der Schnittstellen vom Arbeitsmodul

Das Arbeitsmodul ist in diesem Bild in der Ausprägung Robotermodul dargestellt. Die Schnittstelle zum AGV (1) wird über den Hubaufbaukasten auf dem AGV bedient, so dass die mechanische Kopplung zwischen Transportfahrzeug und Arbeitsmodul durch das Fahrzeug erfolgt. Die zweite Hardware-Schnittstelle besteht zu den SAM-Beinen (2). Die Beine werden mechanisch durch das Einfahren des AGV mit ausgerüstetem Arbeitsmodul in der Ablagestation der Beine gekoppelt. Die Verriegelungseinheit zwischen Arbeits- und Stand-Alone-Modul muss angesteuert werden, damit die Beine zurück in die Ablage gelegt werden können. Zusätzlich verfügt das SAM über Motoren zur Breitenverstellung, für einen sicheren Stand, und eine Höhenverstellung, zur Freigabe der Sicherheitsscanner des AGVs. Diese Antriebe werden aus dem Arbeitsmodul heraus angesteuert, da die Beine über keine eigene Steuerungseinheit verfügen.

Als Zentrale Logikeinheit des Arbeitsmoduls kommt ein Raspberry Pi 4B zum Einsatz, welcher in der folgenden Abbildung zentral angeordnet ist. Die Abbildung verdeutlicht das Steuerungskonzept der Arbeitsmodule. Der RaspPi verfügt über eine Pinheader-Leiste mit 40 Pins, von denen einige als general purpose inputs/outputs (GPIOs) konfiguriert werden können. Ein Teil der GPIOs werden genutzt um eine SPI Schnittstelle für die Auswertung der RFID Reader zu erzeugen. Ein weiterer Teil der GPIOs wird verwendet um die DC Motoren des SAMs über eine Relais-Board zu treiben, ebenso werden die Verriegelungseinheiten über das Relaisboard gepowert. Eine Anbindung an den Safety-Kreislauf des Arbeitsmoduls ist vorzusehen, um eine Abschaltung der Motoren im Notfall bei Betätigung eines Notaus-Schalters am Modul sicher zu stellen.

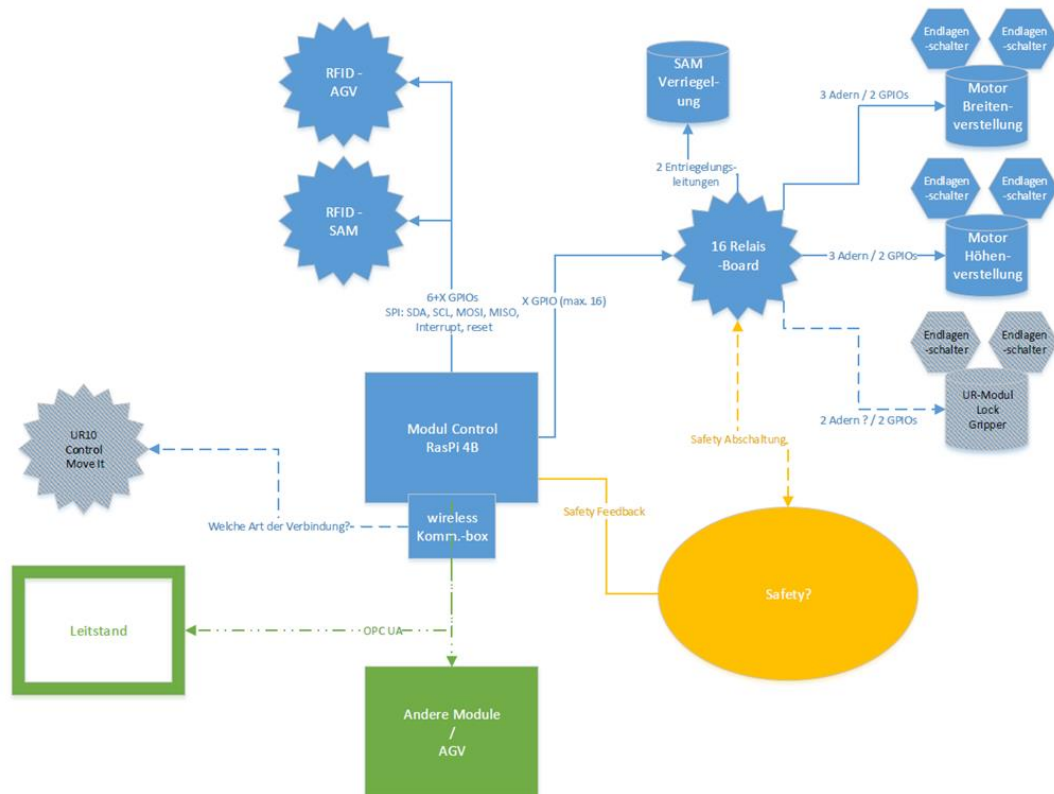


Abbildung 21: Übersichtsschaubild Steuerung des Arbeitsmoduls

Eine Identifikation der Kopplungspartner erfolgt per RFID Tag am AGV, sowie an Ablagestation, bzw. Stand-Alone-Modul. Der zweite Reader kann doppelt verwendet werden, da nur entweder das SAM anbaut ist, oder sich das Arbeitsmodul in der Ablagestation befindet.

Die Kommunikation zwischen anderen Systemgeräten und dem Arbeitsmodul erfolgt per OPC UA, bspw. zum Leitsystem. Dazu ist der RaspPi über die Ethernet-Schnittstelle an eine Kommunikationsbox der Firma Wireless Consulting angeschlossen, welche dann das drahtlose vermaschte Netzwerk aufbaut. Auch die AGVs erhalten eine solche Kommunikationsbox, sodass über die OPC UA Schnittstelle die Module und AGVs ihre Informationen austauschen können.

Nach dem aktuellen Konzept hat das Roboterarbeitsmodul noch eine weitere Motoreinheit die zur Verriegelung des Greifers am Roboterarm dient, wenn dieser ein großes Bauteil manipulieren soll. Für dieses Modul ist ferner zu klären ob der RaspPi auch die Bewegungskontrolle des Roboterarms durchführen soll, oder ob ein Triggern von gelernten Bewegungsabläufen für das Anwendungsszenario ausreichend ist.

6.3.2 AP 2.2: Entwicklung einer generischen Modulaufnahme

Das Konzept der generischen Modulaufnahme wurde bereits im Zuge der Ausgestaltung des Modularitätskonzepts definiert und besteht aus zwei wesentlichen Punkten. Einerseits aus der Schaffung einer standardisierten Schnittstelle zur mobilen Einheit, andererseits aus der Entwicklung des

Standard Arbeitsmoduls, das die Verbindung zum SAM System ermöglicht und mit unterschiedlichen Aufbauten wie Roboter, Hilfskinematik oder Bauteilaufnahme ausgestattet werden kann. Weiterhin beinhaltet das Arbeitsmodul alle notwendigen Komponenten zur energetischen und kommunikativen Versorgung. Abbildung 22 zeigt das modulare Gesamtsystem und die Schnittstellen zwischen Arbeitsmodul und AGV sowie zwischen Arbeitsmodul und SAM. Außerdem ist das standardisierte Arbeitsmodul zu erkennen, auf das in diesem Fall ein Roboter montiert ist.

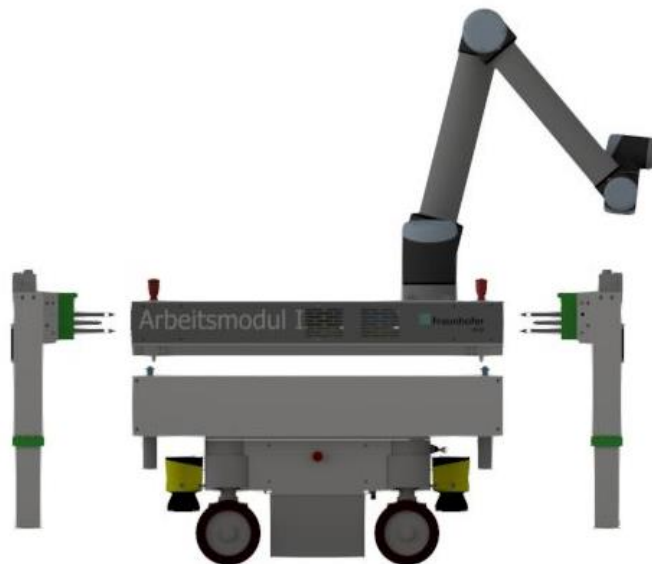


Abbildung 22: Modularität und Hardwareschnittstellen im Gesamtaufbau

Um das modulare Konzept mit unterschiedlichen AGVs nutzen zu können dient das Liftsystem neben der, für das Koppeln der Arbeitsmodule, zwingend notwendigen Liftfunktion auch der Schaffung einer standardisierten Schnittstelle der AGVs. Im Projekt wurden drei unterschiedliche AGVs verwendet, die *Neobotix MPO-700*, *MiR 200* und die im Projekt neu entwickelte *Neobotix neo*. Alle drei besitzen etwas unterschiedliche Bauhöhen, die durch Anpassung des Liftes ausgeglichen werden. So wird im Gesamten eine mobile Einheit mit einer einheitlichen Höhe und einer einheitlichen Schnittstelle zur Aufnahme von Arbeitsmodulen erreicht.

Die Schnittstelle zur Aufnahme von Arbeitsmodulen ist in Abbildung 23 dargestellt. Der Spindelhub des Liftes ist mit einem T-Kopf versehen. Dieser T-Kopf wird in einer horizontalen Fahrbewegung des AGV in die C-Schiene eingeführt, die unter den Arbeitsmodulen montiert ist. Der Toleranzausgleich in seitlicher Richtung erfolgt durch einen Trichter am Eingang der C-Schiene, in Stoßrichtung wird ein Sensor verwendet, der die Fahrbewegung des AGVs stoppt sobald dieses in Position ist. Zur Feinpositionierung und Positionssicherung dienen zwei Dornen, die am Arbeitsmodul sitzen und in Führungsbuchsen im Deckel des Liftes eingeführt werden. Durch diese horizontale Variante

der Modulkopplung wird eine sehr flache Bauweise mit einem großen Toleranzausgleich erreicht, was dem Gesamtsystem zugutekommt und einen geringen Hub des Liftsystems ermöglicht.

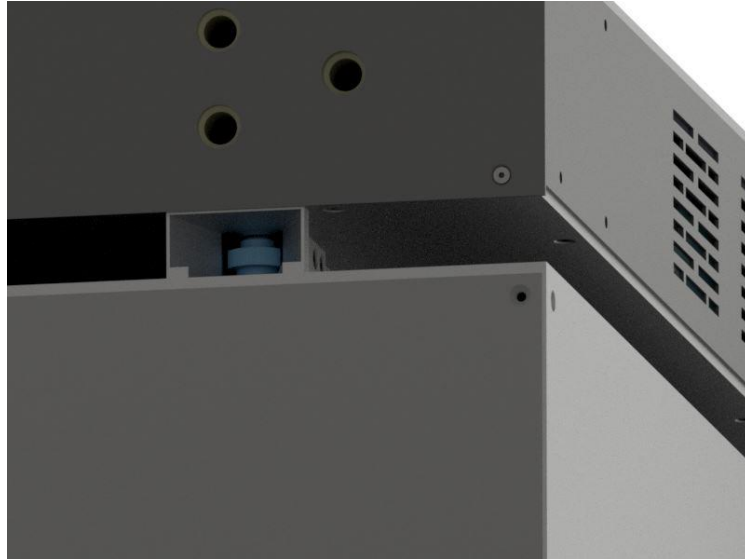


Abbildung 23: Detaildarstellung der Schnittstelle zwischen AGV und Arbeitsmodul

Das standardisierte Arbeitsmodul besteht aus einer Konstruktion aus Aluminiumprofilen und Blechen zur Versteifung und Verkleidung. Die Abmessungen sind so gewählt, dass die wesentlichen Komponenten zur Versorgung und Steuerung im inneren untergebracht und alle weiteren Module gekoppelt werden können. Durch den gleichbleibenden Aufbau und die standardisierte Schnittstelle zum SAM sowie die Möglichkeit verschiedene Aufbauten umzusetzen trägt es entscheidend zur Generik des Gesamtsystems bei.

Die Schnittstelle zum SAM besteht arbeitsmodulseitig aus sechs Buchsen pro Seite, in die passende Aluminiumstifte am SAM passen und verriegelt werden können, siehe Abbildung 24. Die Verriegelungsaktorik sowie die Hardware zur Ansteuerung dieser und des gesamten SAM sind ebenso wie eine Energieversorgung im inneren des Arbeitsmoduls untergebracht. Damit sind die SAM komplett passiv gehalten und werden über einen Steckkontakt vom Arbeitsmodul versorgt.

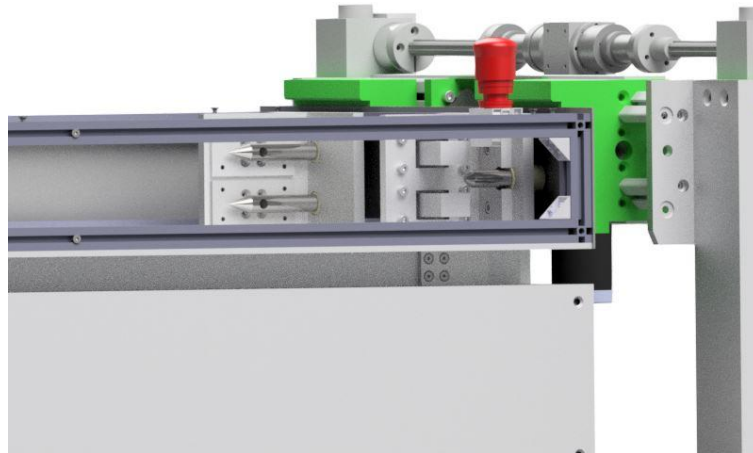


Abbildung 24: Schnittstelle zwischen Arbeitsmodul und SAM

Die Möglichkeit unterschiedliche Systeme auf das Arbeitsmodul aufzubauen wird im Projekt durch den Aufbau eines Roboters, einer Hilfskinematik und verschiedener Bauteilträger gezeigt. Die Systeme werden in das jeweilige Arbeitsmodul integriert und von diesem energetisch und steuerungstechnisch versorgt. Jedes Arbeitsmodul kann das SAM koppeln und von jedem AGV transportiert werden.

6.3.3 AP 2.3: Entwicklung einer mobilen Einheit für Flugzeugrumpfstrukturen

Im Rahmen des AP 2.3 unterstützte das Fraunhofer IFAM den Projektpartner Neobotix bei der Entwicklung einer mobilen Einheit, die speziell für den Einsatz in Flugzeugrumpfstrukturen geeignet ist. Vor dem Start der Entwicklung wurden die Anforderungen für ein solches AGV von den beteiligten Partnern erarbeitet und festgehalten. Es ergaben sich folgende Anforderungen:

- Für den Anwendungsfall sind Dreh-Fahr-Module als Antriebsart geeignet, Mecanum-Rad-Antriebe kommen aufgrund des Materialabriebs nicht in Frage
- Das Gesamtgewicht soll so gering wie möglich gehalten werden, dies bildet das Kernkriterium in der Entwicklung der Einzelkomponenten
- Bei maximaler Beladung dürfen die zulässigen Punkt- und Flächenlasten der Vorgaben von Airbus für den Boden im Flugzeugrumpf nicht überschritten werden
- Die Breite des AGVs muss ein Einfahren in den Rumpf durch die Kabinentür weiterhin ermöglichen, auf Kippstabilität bei der Funktionserfüllung der gekoppelten Arbeitsmodule ist dabei zu achten
- Die Länge ist ebenfalls gering zu halten, jedoch so auszulegen, dass die Arbeitsmodule ihre Funktion bei Erhalt der Kippstabilität erfüllen können
- Die Höhe ist so zu gestalten, dass ein AGV mit den unterschiedlichen Arbeitsmodulen im Rumpf weiterhin bewegt werden kann

- Die Traglast muss in Abstimmung mit den zu entwickelnden Arbeitsmodulen ausgelegt werden, kann anfangs als Annahme jedoch vom existierenden System MPO-700 übernommen werden
- Eine maximale Geschwindigkeit von 0,8 m/s ist aufgrund beengter Platzverhältnisse ausreichend und sinnvoll
- Die Beschleunigung und Verzögerung sollte konfigurierbar sein, um beispielsweise nicht zu viel Last auf einzelne Räder zu bringen
- Zur Ladung muss eine gängige 3kW Steckdose ausreichen
- Die Laufzeit ist möglichst lang auszulegen, jedoch überwiegt das Kriterium Gesamtgewicht
- Zur Navigation sollen Laserscanner mit erhöhter Genauigkeit im Vergleich zum Vorgänger eingesetzt werden, um genauere Messdaten zu erhalten
- Die benötigten Schnittstellen sind in Abstimmung mit den zu entwickelnden Arbeitsmodulen und sonstigen Anbindungskomponenten zu gestalten
- Die Ausgestaltung von Sicherheitsfunktionen gilt es im Projekt zu klären
- Die Position der Laserscanner (Vorne und Hinten oder Diagonal) gilt es im Projekt zu klären

Nachdem Neobotix auf Basis der hauseigenen MPO-700 und des oben beschriebenen Anforderungskatalogs den zugrunde liegenden Entwurf des Chassis inklusive Batteriefach, die Auslegung der benötigten Elektronik und deren Platzbedarf sowie die Sicherheitstechnik in Form von Laserscannern vorbereitet hatte, wurden regelmäßige Arbeitsmeetings durchgeführt, um sich so iterativ dem angestrebten Ergebnis und somit der Erfüllung der Anforderungen zu nähern. Dabei wurden folgende Anmerkungen aufgenommen und von Neobotix umgesetzt beziehungsweise in die weitere Entwicklung einbezogen:

- Im Rahmen des Projektes bilden AGV und Liftsystem zur Aufnahme der Arbeitsmodule stets eine Einheit
- Eine Durchführung von Kabeln in das Liftsystem wird vorgenommen, um beispielsweise das Display, den Schlüsselschalter und Not-Aus Knöpfe sowie Ethernet und USB-Anschlüsse besser zugänglich zu machen
- Die im Rahmen des Projektes entwickelten SAM-Beine haben eine Breite von 660 mm, eine Türdurchfahrt in den Rumpf (min. 810 mm breit) muss damit softwareseitig gewährleistet werden
- Die Laserscanner müssen aufgrund der maximalen Breite beim Ein- und Ausfahren des AGVs durch die SAM-Beine vorne und hinten mittig, nicht diagonal angebracht werden
- Im Liftmodul wird ein RFID-Reader für die Erkennung des gekoppelten Arbeitsmoduls eingesetzt, dessen Auswertung auf dem Neobotix SBC stattfindet, weshalb der SBC um ein GPIO Board erweitert werden muss
- Die Benötigte Leistung für das Liftmodul und dort enthaltene Komponenten umfasst 350W (48V) für den Motor des Spindelhubs, 25W (48V) für dessen Bremse und 50W (24V) für sonstige Peripheriekomponenten
- Auf einen Schutz für das Überfahren von Füßen wird zugunsten erhöhter Bodenfreiheit verzichtet

- Die Laserscanner sind auf der Höhe der Laserscanner-Ebene der MPO-700 anzubringen, um die gleichen Karten nutzen zu können
- Zur Gestaltung der Räder wird auf Druckmessversuche mit der MPO-700 auf Flugzeug-Bodenplatten zurückgegriffen, erste Versuche lassen darauf schließen, dass Druckspitzen an den 90 Grad Außenkanten der Räder des AGVs auftreten, bestätigt sich der Verdacht können die Radkanten mit einem Radius abgerundet werden
- Eine zügige Lösbarkeit von Lift und AGV ist wünschenswert für kurzfristige Wartungsarbeiten

Parallel zu den Hardwarethemen unterstützte das das IFAM bei der Ausgestaltung der Software zur Steuerung der mobilen Robotik.

Navigation

Das wichtigste Software-Framework für die Navigation von AGVs ist ROS (Robot Operating System). Es ist eine bekannte, weit verbreitete, kostenlose und quelloffene Sammlung von Programmen für die Entwicklung von Robotern. Es gibt 2 Versionen von ROS: ROS1 und ROS2. ROS1 wird nicht mehr unterstützt und durch den Nachfolger ROS2 ersetzt. ROS2 ist eine verbesserte Echtzeit-Version und für den Einsatz in Multi-Robotersystemen konzipiert. Daher wurde es als Hauptentwicklungsrahmen für dieses Projekt ausgewählt. ROS2 hat verschiedene Distributionen, von denen die wichtigsten sind: Foxy Fitzroy, Galactic Geochelone und Humble Hawksbill. Die Galactic-Distribution wurde als Hauptdistribution für dieses Projekt gewählt, da sie eine bessere Stabilität und eine gute Unterstützung durch die Entwicklergesellschaft aufweist.

Im Projekt wird der vom Partner Neobotix entwickelte omnidirektionale mobile Roboter MPO-700 eingesetzt. Auf Grundlage dieses Modells basiert auch die neu entwickelte Plattform sowohl hinsichtlich ihrer Hard- als auch der Software. Neobotix stellte im Projekt alle notwendigen Softwarepakete für die Robotersteuerung zur Verfügung. Als Teil dieses Projekts wurden die neuen ROS2-Pakete für die Roboternavigation von Neobotix in Zusammenarbeit mit dem IFAM entwickelt.

Beschreibung der Hauptpakete

Im Einzelnen wurden die folgenden Pakete erstellt und bearbeitet:

- Neo_mpo_700-2: das Roboterkonfigurationspaket. Es enthält ein Robotermodell und Startdateien.
- Neo_kinematics_omnidrive2 enthält einen omnidirektionalen Solver für die Roboterkinematik.
- Neo_localization2 ermöglicht die Abschätzung der Roboterposition auf einer 2D-Karte.

- Neo_local_planner2 ist die Steuerung der Roboternavigation, die der geplanten, globalen Route folgt.
- Neo_commander ist eine Sammlung von Skripten zur Navigationssteuerung.

Weiterhin werden die Komponenten der Navigation des mobilen Roboters mpo-700 beschrieben. Die Navigation in ROS2 ist als Nav2-Projekt implementiert. Es ist eine Sammlung von notwendigen Paketen für die Navigation von mobilen Robotern. Die offizielle Nav2-Architektur ist in der Abbildung 25 dargestellt.

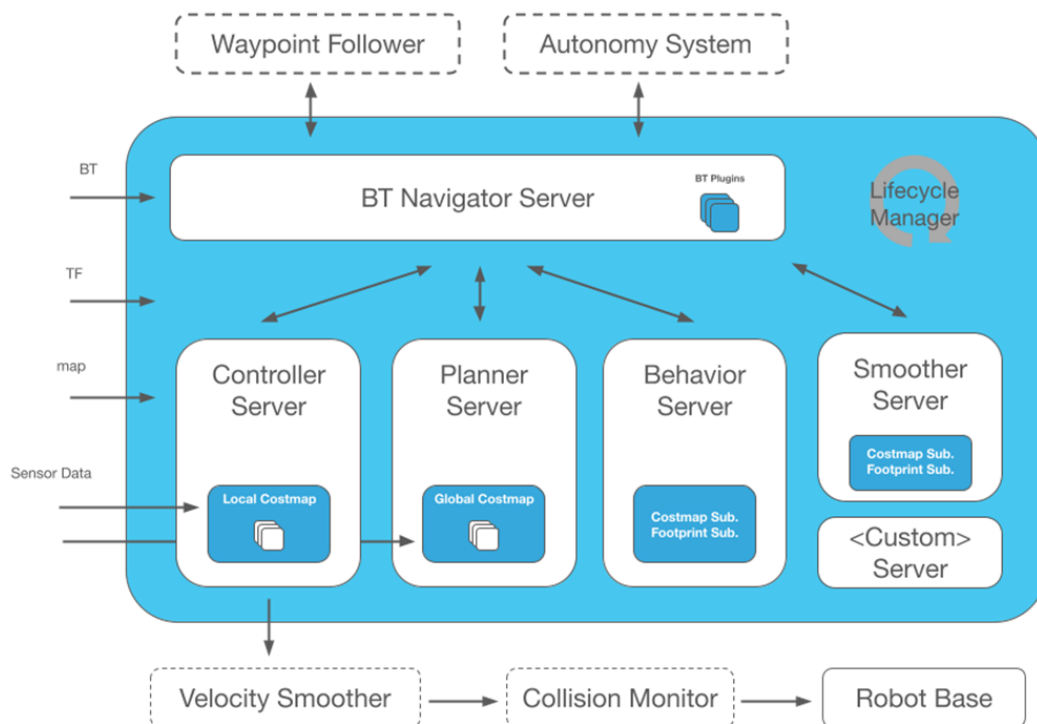


Abbildung 25: Nav2 Architektur

Diese Architektur kann in Abhängigkeit von der Roboterkinematik und den Navigationszielen angepasst werden. Die ausgewählten und getesteten Teile des Nav2 werden im Folgenden beschrieben.

Map building

ROS2 verfügt über eine slam-toolbox, welche Pakete zur Kartenerstellung und Lokalisierung bereitstellt. Die Ergebnisse der Tests zur Kartenerstellung zeigen, dass es Probleme bei der Kartenerstellung in einer nicht abgeschlossenen Umgebung gibt. Daher wurde entschieden, das Paket gmapping aus ROS1 als Hauptlösung zur Kartenerstellung für dieses Projekt zu verwenden. Gmapping bietet eine gute Kartenqualität mit einer Auflösung von 3-2,5 cm pro Pixel.

Localization

Das Standardpaket zur Lokalisierung von mobilen Robotern auf einer 2D-Karte in ROS2 ist AMCL (Adaptive Monte-Carlo Localizer). Neobotix hat ihr eigenes Lokalisierungspaket neo_localization2 entwickelt. Der Vorteil dieses Pakets ist, dass es das komplexe kinematische Modell des Roboters berücksichtigt. Damit wird die Genauigkeit in der Lokalisierung gegenüber herkömmlichen Verfahren trotz falscher Odometrieinformationen aufgrund von Verrutschen der Räder nicht mehr so stark beeinflusst. Tests beider Lokalisierungspakete zeigen den Vorteil von neo_localization2. Die Genauigkeit der Lokalisierung liegt auf der aktuellen Stufe bei 1-2 cm, was das Aufnehmen des SAM nur mit Laserscannern und einer Karte ermöglicht. Es wurden keine zusätzlichen Sensoren verwendet.

Global planner

ROS2 bietet verschiedene Arten von globalen Planern. Der globale Planer (Definition aus ROS1) wird in ROS2 Planner Server genannt und berechnet den statischen Pfad in der 2D-Karte. Der Standardplaner in ROS2 ist NavfnPlanner, welcher für dieses Projekt ausgewählt wurde. Er liefert einen Weg, der auf der A*- oder Dijkstra-Methode basiert.

Local planner

Der lokale Planer (Definition in ROS1) wird in ROS2 Controller Server genannt. Er berechnet den Geschwindigkeitsbefehl für das AGV, um dem Pfad des globalen Planers zu folgen. In diesem Projekt wurde neo_local_planner2 für den mobilen Roboter MPO-700 gewählt. Dieser lokale Planer wurde verbessert, um eine Rückwärtsbewegung zu ermöglichen, die für Docking-Aufgaben erforderlich ist.

Dynamische Veränderung der Parameter

Einer der Vorteile von ROS2 ist eine einfache Änderung der Parameter. Diese Option wurde verwendet, um Parameter wie die maximale Geschwindigkeit, den Footprint und das Zulassen oder Deaktivieren der Rückwärtsbewegung dynamisch zu ändern. Dies gibt Flexibilität bei der Verwendung verschiedener Konfigurationen für die Roboternavigation, wie z.B. Docking-Aufgaben oder Bewegung mit maximaler Geschwindigkeit auf langen Strecken.

Steuerung der Formation

Neben den Standardfunktionsbausteinen konzentrierte sich das IFAM auch auf die Steuerung einzelner und mehrerer AGVs zur Navigation als Gesamtsystem in einer Formation.

Für den Transport von großen Bauteilen wurde in diesem Projekt die Formationssteuerung der AGVs dezentralisiert. Sie wird benötigt, um Bauteile zu transportieren, deren Abmessungen größer sind als die Größe des AGVs. Es gibt verschiedene Ansätze, um dies zu realisieren. In diesem Projekt

wurde der virtuelle Leader-Follower-Ansatz gewählt. Die Steuerung der Formation von 2 mobilen Robotern im Leader-Follower-Ansatz setzt voraus, dass einer von ihnen ein Leader ist. Dies erhöht die Komplexität der Steuerung der Formation erheblich, da das Zentrum der Formation vom geometrischen Zentrum der Formation verschoben ist. In diesem Fall kann ein virtueller Anführer verwendet werden. Die Formation aus zwei realen Robotern mit einem virtuellen Anführer in der Mitte ist in Abbildung 26 dargestellt. Diese Konfiguration erleichtert die autonome Steuerung der Formation, da sie wie eine Bewegung eines einzigen großen AGV dargestellt wird.

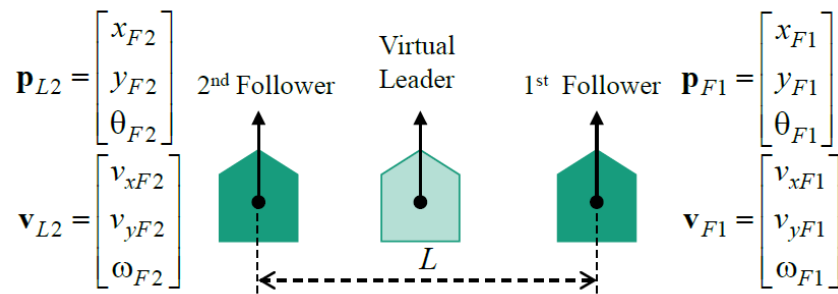


Abbildung 26: Formation von Robotern mit einem virtuellen Leader

Abbildung 27 zeigt den gesamten Regelkreis des Formationslenkers mit einem virtuellen Führer. Hier sendet der Formationslotsen Befehle an beide Follower

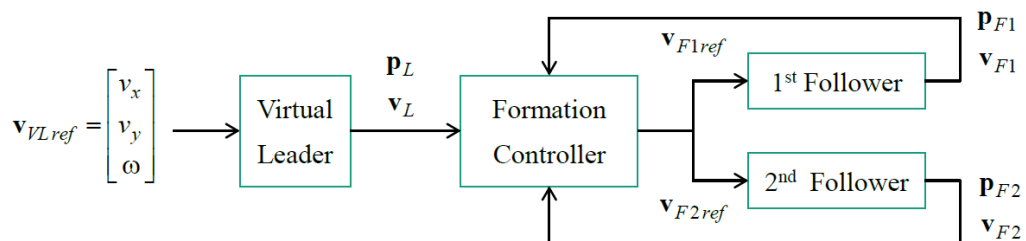


Abbildung 27: Architektur der Formationssteuerung mit virtuellem Leader

Die autonome Navigation einer Formation kann mit den Standard-ROS-Lösungen realisiert werden. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die gesamte Formation ein einziger mobiler Roboter ist. Die Standard-ROS-Lokalplaner setzen voraus, dass sich der Ursprung des Roboters in der Mitte der Roboteraufstandsfläche befindet (Abbildung 28).

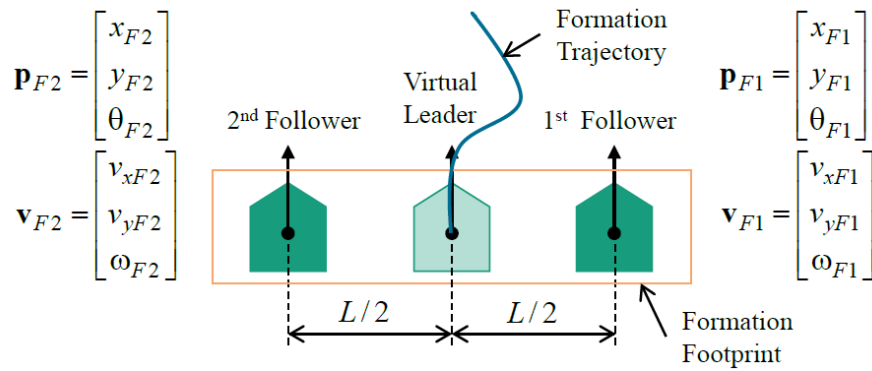


Abbildung 28: Autonome Navigation der Formation

In diesem Fall kann die Lösung mit einem virtuellen Führer verwendet werden, und der Fußabdruck des virtuellen Führers kann als Fußabdruck der gesamten Formation betrachtet werden. Der gesamte Regelkreis der Formationssteuerung bei der autonomen Navigation ist in Abbildung 29 dargestellt. Hier kommt der Befehl für die Geschwindigkeit des virtuellen Führers vom lokalen ROS-Planner.

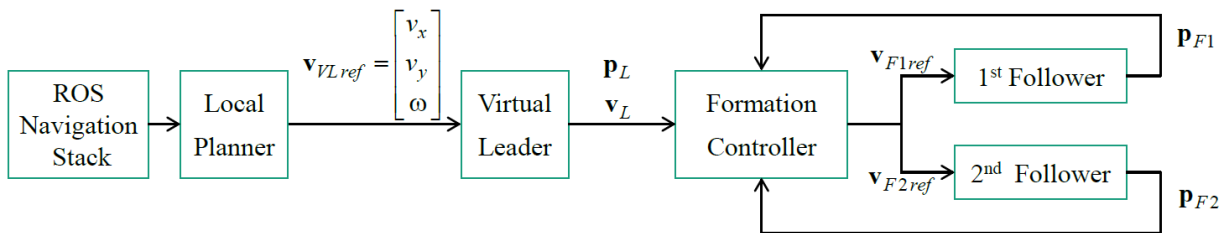


Abbildung 29: Gesamtregelkreis des Formationsreglers im autonomen Navigationsmodus

Wenn der virtuelle Anführer dem Befehl des lokalen Planers folgt und die Verfolger die Formation innerhalb des Formations-Footprints halten, kann die gesamte Funktionalität des ROS-Navigations-Stacks genutzt werden. Das bedeutet, dass es möglich ist, nicht nur die autonome Navigation entlang des lokalen Planers zu nutzen, sondern auch Hindernisse zu berücksichtigen.

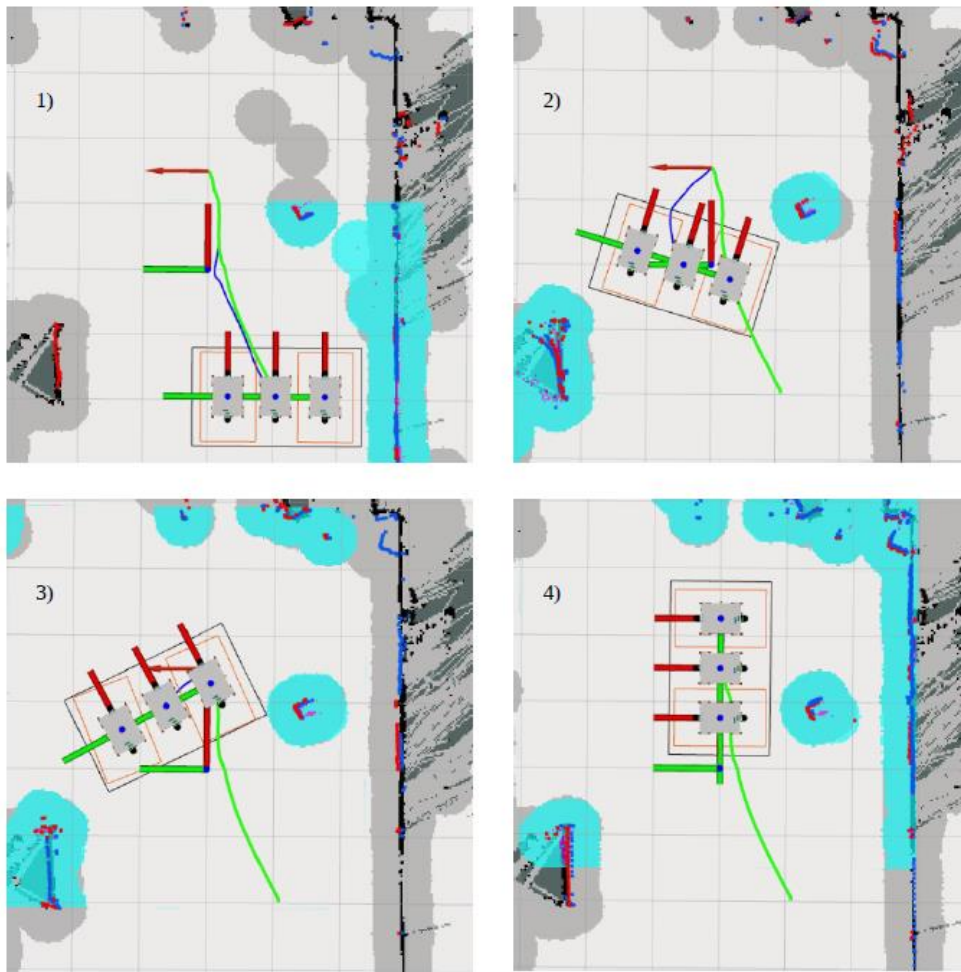


Abbildung 30: Autonome Navigation mit Hindernisvermeidung in Rviz

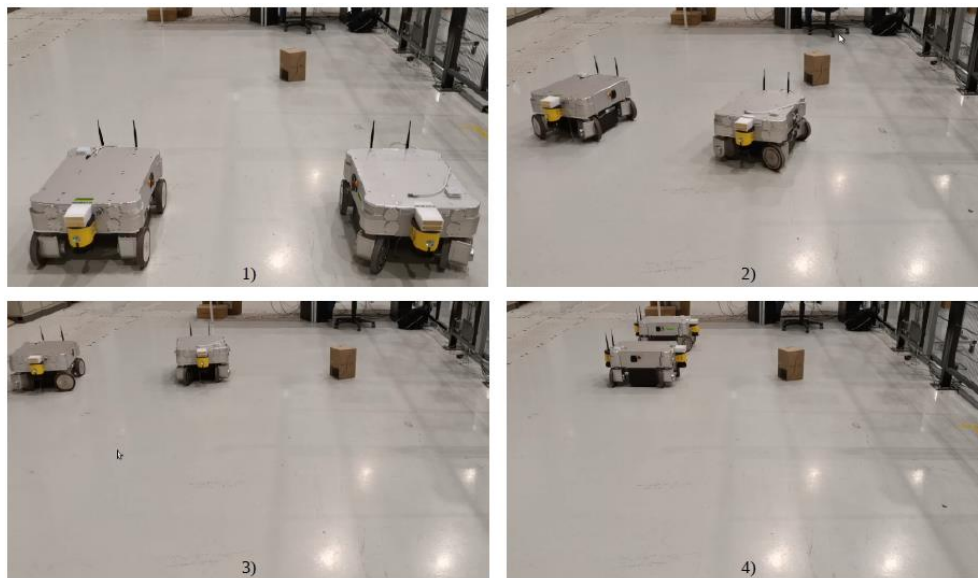


Abbildung 31: Autonome Navigation mit Hindernisvermeidung

Der Test (Abbildung 30 und Abbildung 31) zeigt einen praktischen Anwendungsfall für einen Leader-Follower-Formationscontroller, bei dem der Leader ein virtueller Roboter in der Mitte der Formation ist. Es zeigt sich, dass die vorgeschlagene Idee, den virtuellen Anführer als großen Roboter einzuführen, der eine Grundfläche hat, die der Größe der Formation entspricht, funktioniert. Sie ermöglicht die Verwendung von Standard-ROS-Paketen und -Lösungen, z. B. Navigation Stack, in Kombination mit einem Leader-Follower-Formationscontroller. In diesem Fall (Abbildung 30) bewegt sich die lokale Kostenkarte mit der Formation und kann das Hindernis erkennen. Der lokale Planer geht davon aus, dass er den großen Roboter steuert, der das Verhalten des virtuellen Führers und den Fußabdruck der Formation hat. Zwei Dinge sind dabei zu beachten. Erstens können die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Formation von der Seite des virtuellen Führers eingestellt werden. Zweitens erlaubt die Formationssteuerung der beiden Nachfolger, dass ihre Fußabdrücke innerhalb des Formationsfußabdrucks bleiben.

6.4 HAP 5: Integration, Validierung und Dokumentation

Projektabschließend wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Arbeitspakete in einem Demonstrator im 1:1 Maßstab gemeinsam mit den Verbundpartnern umgesetzt. Anhand des Demonstrators werden die im Verbund entwickelten Technologien und Anlagenteile mit Blick auf die Optimierung des Montageprozesses validiert, bewertet und dokumentiert.

6.4.1 AP 5.1: Integration der Hard- und Softwarekomponenten in ein Gesamtsystem

Im AP 5.1 wurden alle entwickelten Teiltechnologien in ein Gesamtsystem, bestehend aus mehreren mobilen Plattformen und verschiedenen Arbeitsmodulen, dem übergeordneten Managementsystem und dem im HAP 3 entwickelten dynamischen Kommunikationsnetz, integriert.

Mit Fertigstellung der ersten Hardware-Komponenten begann die Integrationsarbeit zum Gesamtsystem. Um zeitnah die wichtigsten Funktionen in Betrieb nehmen und parametrieren zu können wurde der Fokus zunächst auf die Ablagestationen (siehe Abbildung 32), die SAM-Beine, das Arbeitsmodul des Roboters und ein AGV-Liftsystem gelegt (siehe Abbildung 35). So wurde bei ersten Tests festgestellt, dass das Einfahren eines AGVs unter ein Arbeitsmodul, welches auf SAM-Beinen steht oder in einer Ablage liegt, einer gewissen Genauigkeit bedarf, die mit der Standardansteuerung der AGVs nicht erreicht wird. Deshalb erarbeitete der Verbundpartner Neobotix an einer Lösung, bei der iterativ relativ zur aktuellen Position – bestimmt über die Auswertung der AGV-Laserscanner – die Zielposition mit deutlich verbesserter Genauigkeit angefahren werden kann.



Abbildung 32: Ablagestationen geplant (Arbeitsmodul links, SAM rechts)



Abbildung 33: Ablagestationen umgesetzt (links mit abgelegten Arbeitsmodul)



Abbildung 34: Ablagestation für SAM-Beine umgesetzt (oben: frontal, unten: seitlich)



Abbildung 35: Robotermodul geplant (oben), AGV mit Lift (unten), SAM-Beine (seitlich)

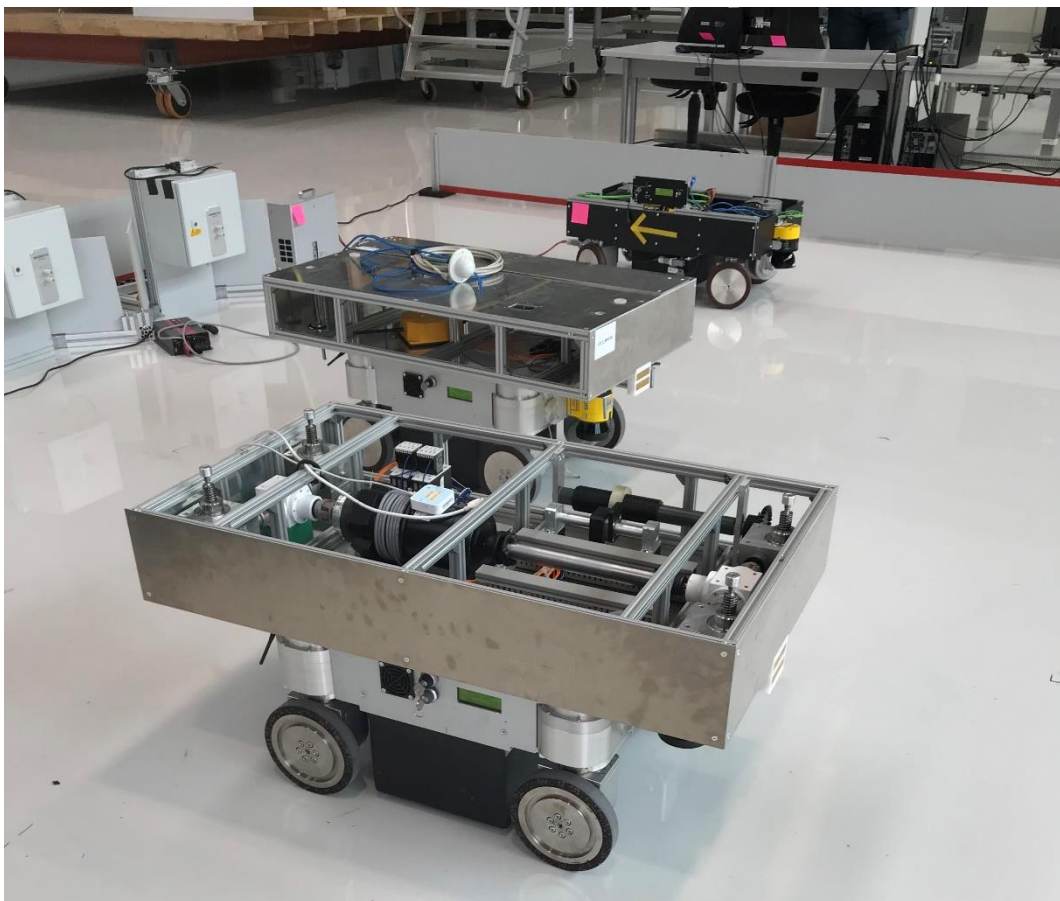


Abbildung 36: AGVs mit Lift-Modulaufbauten



Abbildung 37: Innerer Aufbau des Liftmoduls



Abbildung 38: Arbeitsmodul mit SAM-Beinen

Nach der mechanischen Fertigung sowie der elektrischen Verdrahtung der priorisierten Hardware wurde die Software zur Bereitstellung der Skills der einzelnen Ressourcen für das übergeordnete Prozessmanagement-System implementiert. Damit sind unter anderem die Erkennung von RFID-Tags zur Soll-Ist-Überprüfung bei An- und Abkopplungsvorgängen, die Ansteuerung der Lifte der AGVs zur Aufnahme und Ablage von Arbeitsmodulen oder SAM-Beinen, die Ansteuerung der Verriegelungsmotorik für gekoppelte Komponenten sowie die Sensorauswertung und die Robotersteuerung gemeint.

Das übergeordnete Prozessmanagement- und das Fleetmanagementsystem der AGVs sowie die OPC UA Kommunikation wurde vorab in einer Simulationsumgebung entwickelt und auf den acht Kommunikations- und Steuerungs-SoCs der einzelnen Module getestet, bevor es anschließend in der finalen Version ausgerollt wurde.

Die benötigte Hardware zur Inbetriebnahme des im Projekt entwickelten dynamischen Kommunikationsnetzes wurde vom verantwortlichen Projektpartner wireless.consulting vorkonfiguriert und in die Forschungsumgebung integriert beziehungsweise in die Module eingebaut. Nach den Funktionstests erfolgte eine bedarfsgerechte Anpassungen.

6.4.2 AP 5.2: Validierung des Gesamtsystems am Anwendungsfall Kabinenmontage

Zur Vorbereitung der Validierung wurden Szenarien erarbeitet, die verschiedene Aspekte und Funktionen des Gesamtsystems validierbar machen. Dazu ist nachfolgend zunächst die zum Projektabschluss am IFAM nutzbare Hardware aufgelistet und die Einteilung der verfügbaren Validierungsfläche aufgeführt. Die geplanten Prozesse, die als Validierungsgrundlage dienen sind abschließend beschrieben.

Geplante Hardwareaufbauten

Das Gesamtvalidierungssystem umfasst vier mobile Einheiten (AGV) von den folgenden Typen:

zwei Neobotix MPO-700

eine Neobotix MPO-700 neo (Neuentwicklung im Projekt)

eine MiR200

Auf Basis der AGVs sollen die verschiedenen Module zu einem mobilen, dynamischen Arbeitssystem kombiniert werden. Es kommen insgesamt drei Arbeitsmodule zum Einsatz. Dabei ist eines mit einem Leichtbauroboter und zwei Arbeitsmodel mit je einem Bauteilträger ausgestattet. Hinzukommen zwei Stand-Alone-Module.

Zur Bereitstellung sind drei Ablagestationen für die Arbeitsmodule, eine Ablagestation für die Stand-Alone-Module sowie Ablagen für die im Projekt genutzten Bauteile Hatracks, Sitzreihe und Fensterrahmen vorhanden.

Darüber hinaus werden an verschiedenen Stellen Ladestationen für die AGVs positioniert.

Zur Darstellung der räumlichen Distanz und Simulation von Hindernissen für die im Projekt avisierten Technologien wurden insgesamt vier Bereiche in der Forschungshalle des IFAM in Stade festgelegt. Diese sind der Abbildung 39 zu entnehmen.

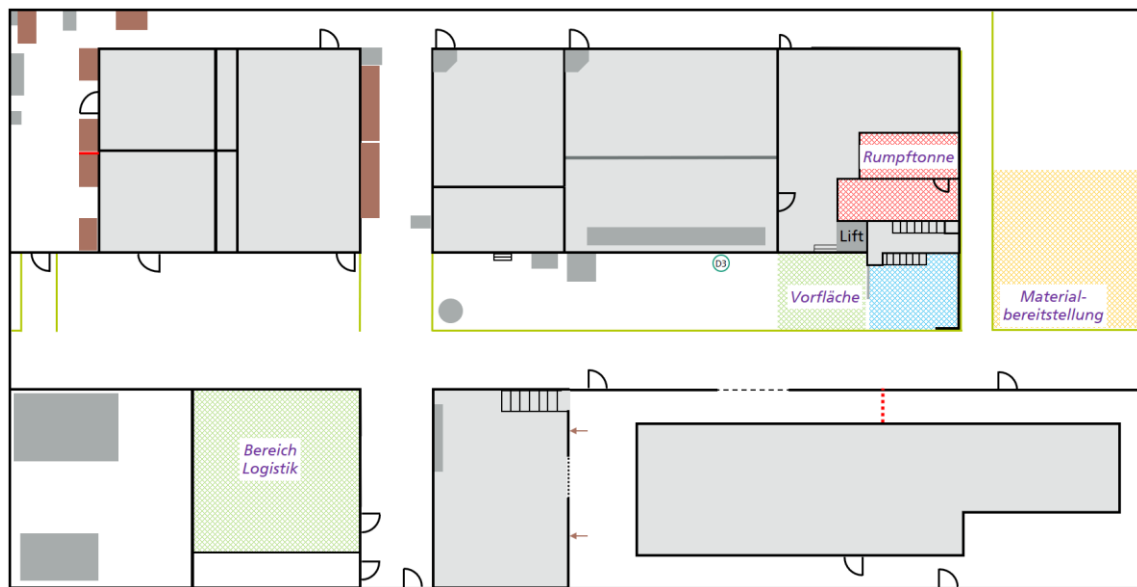


Abbildung 39: Übersichtsplan der Orte in der Forschungshalle

Materialbereitstellung: Demonstration der Bauteilbereitstellung und des Bauteiltransports

Rumpftonne: Demonstration der Arbeitsmodulfunktionen und deren Zusammenarbeit

Vorfläche: Demonstration der dynamischen Arbeitsraumnutzung und ausgelagerte Arbeitsflächen

Bereich Logistik: Demonstration der Systemzusammensetzung und Arbeitsmodulbereitstellung

Prozessvalidierung

Zum Nachweis der Funktionalität durchliefen die in einen Validierungsaufbau integrierten entwickelten Technologien vier Szenarien.

Diese umfassten die Bauteillogistik, das bedarfsgerechte Zusammensetzen von Produktionssystemen, die Interaktion von Multi-Roboter-Systemen und das Taskmanagement.

- Bauteillogistik
 - Hatracktransport vom Lager vor den Rumpf
 - Sitzreihentransport vom Lager in den Rumpf
 - Fensterrahmentransport vom Lager zum ausgelagerten Arbeitsplatz
 - Fensterrahmentransport vom ausgelagerten Arbeitsplatz in den Rumpf
- Produktionssystem
 - Das AGV nimmt die Arbeitsmodule aus der Ablagestation auf
 - Das AGV legt die Arbeitsmodule in der Ablagestation ab
 - Das AGV mit gekoppeltem Arbeitsmodul nimmt das SAM aus der Ablagestation
 - Das AGV mit gekoppeltem Arbeitsmodul legt das SAM in der Ablagestation ab
 - Das AGV mit gekoppeltem Arbeitsmodul und gekoppeltem SAM fährt zu dem ausgelagerten Arbeitsplatz
 - Das AGV mit gekoppeltem Arbeitsmodul und gekoppeltem SAM fährt in den Rumpf
- Multi-AGV-System
 - Mehrere AGVs nutzen gemeinsam eine Karte
- Taskmanagement-System
 - Aufgaben in Skills zerlegen
 - Montagesystem anhand der Skills einzelner Ressourcen für Aufgabe zusammensetzen
 - Aufgaben über OPC UA an den Transportmanager übermitteln
 - Aufnahme von Prozessdaten in den Prozessmanager

6.4.3 AP 5.3: Dokumentation

Neben der schriftlichen Dokumentation der im Projekt entwickelten Konzepte, Technologien und Prozesse wurden die Ergebnisse in einem Projektvideo zusammengefasst.

7 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Der gesamte zahlenmäßige Verwendungsnachweis ist unter Profi-Online zu finden und wird durch das Controlling der FhG-Zentralverwaltung in München bearbeitet.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Luftfahrtindustrie steht vor der Herausforderung die hoch komplexe Flugzeugfertigung mit unzähligen Einzelteilen und Arbeitsschritten wirtschaftlich zu betreiben und auch bei schwankenden Absatzzahlen noch rentabel zu bleiben. Aus diesem Grund hat die Einbindung von Leichtbaurobotik in den meisten Fällen keine Aussicht auf Erfolg, da die initialen Kosten sich über einzelne Anwendungsfälle nicht rechnen und ein Return on Investment zu lange dauert. Weshalb dieses Projekt von Anfang an auf die multiple Einsatzfähigkeit einzelner Technologien setzte und über die bedarfsgerechte Zusammensetzung die Reichweite der Einsatzgebiete und damit der möglichen Anwendungsfälle erhöht, was letztlich das erforderliche Investment verteilt und den Business Case damit deutlich verbessert.

Allerdings stellt die Entwicklung von autonom-mobilen Robotersystemen, die in der Flugzeugfertigung in kooperierenden, selbstorganisierenden und bedarfsgesteuerten Systemen agieren, besonders im Kontext der hohen Anforderungen in der Luftfahrtindustrie ein sehr ehrgeiziges, risikobehaftetes Ziel dar. Die erforderliche Vernetzung der unterschiedlichen Kernkompetenzen machte eine öffentliche Förderung zwingend erforderlich, da keiner der Partner in der Lage war dieses Vorhaben alleine zu bearbeiten und das damit verbundene Forschungsrisiko zu tragen. Eine zielführende Bearbeitung der Thematik erforderte eine interdisziplinäre Zusammenarbeit von Industrie und Forschung, um zum einen die industrielle Verwertung und zum anderen die notwendige Erarbeitung der technologischen Grundlagen sicherstellen zu können.

Das Fraunhofer IFAM stellte in dem Verbundprojekt das Bindeglied zwischen den Industrieunternehmen und dem assoziierten Partner Airbus als potentiellen Technologienutzer dar, um eine anwendungsorientierte Entwicklung der Teilsysteme zu forcieren.

Darüber hinaus wurde das erforderliche Validierungsumfeld aufgebaut und die Teilsysteme unter Aspekten der Forschung und Entwicklung integriert. Die Erprobung und Validierung der Teilsysteme und des Gesamtsystems in enger Abstimmung den Verbundpartnern hat dazu beigetragen, dass das Potenzial der entwickelten Technologien zielgerichtet auf die Bedarfe in der Luftfahrtbranche ausgerichtet wurden. In diesem Zusammenhang hat das Fraunhofer IFAM dazu beigetragen die Wettbewerbsfähigkeit der Verbundpartner durch neue und innovative technologische Fortschritte zu steigern.

9 Voraussichtlicher Nutzen

Als gemeinnützige Forschungseinrichtung ist es der Fraunhofer Gesellschaft untersagt ihre Ergebnisse durch eigene Produktion oder Vertrieb unmittelbar wirtschaftlich zu verwerten. In Übereinstimmung mit den Statuten bezüglich Auftragsforschung und Technologietransfer ist der Nutzen der erzielten Ergebnisse und gewonnenen Erkenntnisse aus dem Vorhaben RoboCoop daher vorwiegend im Kompetenzzuwachs und der daraus folgenden wissenschaftlich und wirtschaftlichen Anschlussfähigkeit zu sehen.

Am Fraunhofer IFAM konnte insbesondere in den Bereichen der Modularisierung von Hard- und Softwaresystemen, der skillbasierten Modellierung von Funktions- und Lösungsräumen, der Verknüpfung und Ansteuerung mobiler Roboterplattformen in einem Multi-Agenten-System, der Entwicklung von Flottenmanagementsystemen zur Multiroboter-Navigation in schwarmähnlichen oder in Formationen agierenden Verbänden sowie der anwendungsorientierten Ausgestaltung von Kleinrobotersystemen mit multiplen Einsatzzwecken ein Kompetenzzuwachs durch das Vorhabens erlangt werden.

Das dabei gewonnene Know-How bildet die wesentliche Grundlage, um die beteiligten Partner bei der weiteren Ergebnisverwertung zu unterstützen. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Bedeutung des Aufbaus von Netzwerken zu betonen, woraus sich oftmals weitere Zusammenarbeiten ergeben. In Form von Direktbeauftragungen aus der Industrie – beispielsweise in beratender Funktion – stellen diese einen wesentlichen Bestandteil der Finanzierungsstrategie der Fraunhofer-Institute dar. Großes Potenzial bietet hier erneut die Nähe und Zusammenarbeit mit dem potentiellen Endanwender Airbus, welcher großes Interesse an smarten Prozesstechnologien zeigt und mit dem Einsatz von entsprechenden Technologien in den kommenden Jahren eine mittel- bis langfristige Verwertungsperspektive bietet.

Die Themen in den genannten Kompetenzbereichen spielen für das Fraunhofer IFAM insbesondere eine große Rolle, da sich ähnliche Anforderungen in weiteren Projekten ergeben, die modulare Fertigungssysteme zum Inhalt haben. Beispielsweise besteht im Projekt Prodigies (LuFo VI-2 FKZ: 20D2123C) großes Interesse, Technologien zur Multiroboter-Navigation zu erforschen und einzusetzen, um die gewonnenen Informationen in der Integration von Modulen in der Kabinenumgebung zu verwenden. Zudem ist das Konzept der Prediction Skills in der Ausgestaltung und Steuerung von bedarfsgerecht zusammengesetzter Fertigungssysteme im Projekt Prodigies zur Weiterentwicklung vorgesehen. Auch die Integration von Informationsmodellen zum Datenaustausch über Industrie 4.0-Protokolle wie OPC UA zum Zweck einer vollständigen und automatisierten Prozesskette wird in einem Großteil laufender Projekte eingesetzt.

Nicht zuletzt hat das Projekt auch zur Sicherung und Wertsteigerung von bereits getätigten Investitionen beigetragen und folglich einen wichtigen Beitrag zur Sicherung und dem zukunftsfähigen Ausbau des Standorts Stade, bzw. des CFK NORD für den Luftfahrtbau geleistet.

10 Bekanntgewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Im Laufe des Vorhabens sind auf dem Gebiet der Leichtbaurobotik und der Mobilen Robotik eine Vielzahl neuer Produkte auf dem Markt gekommen. Hier sticht insbesondere das von Broetje Automation entwickelte System einer autark arbeitenden Leichtbauroboterstation (Abbildung 40), welche durch ein AGV aufgenommen werden kann, hervor. Dieses Konzept verfolgt mit Blick auf die Verringerung der Stillstandzeiten von Ressourcen im Grunde dasselbe Ziel, wie die in RoboCoop entwickelten Systeme.



Abbildung 40 Autark arbeitende Leichtbaurobotereinheit von Broetje Automation zum Einsatz in der Flugzeugfertigung

Da die Lösung von Broetje Automation über fest montierte Beine verfügt und die Modularisierung in RoboCoop an diesem Punkt weitergeht, wurde die Betrachtung im Projekt nicht verworfen. Gerade die Möglichkeit der bedarfsgerechten Zusammenstellung einer Fertigungseinheit mit dem übergeordneten Prozessmanagement und die Einbindung der Stand-Alone-Module als explizite Funktion der autarken Arbeit geht über den von Broetje Automation gewählten Ansatz hinaus.

11 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Während der Projektlaufzeit erfolgten keine Veröffentlichungen der Projektinhalte oder Ergebnisse. Insbesondere aufgrund der Corona-Pandemie wurden zahlreiche Konferenzen und Messen abgesagt. Zuletzt wurde jedoch bereits damit begonnen auf öffentlichen Veranstaltungen, Konferenzen und Messen das Projekt RoboCoop als Beleg der Funktion von flexiblen Fertigungssystemen im Bereich der Leichtbaurobotersysteme aufzuführen. Vereinzelt konnten auch andere Branchen mit dem Grundkonzept angesprochen werden. Beispielsweise dient das Projekt als Grundlage zur Gestaltung von Projektideen im Bereich der Medizintechnik.

Auch regelmäßige Veranstaltungen vor Ort am CFK Nord, bei denen entsprechende Projektinhalte vorgestellt und Live-Demos vorgeführt werden, fanden bereits statt. Zur weiteren Steigerung der Aufmerksamkeit wurde ein Video der Projektergebnisse produziert, welches medienwirksam für die Veröffentlichung genutzt werden soll.

Folgende Kanäle für die Veröffentlichung des Videos sind geplant:

- FhG Website
- Social Media
- Veranstaltungen am CFK-Nord

Im Juni 2025 findet in Bremen die SysInt (System-Integrated Intelligence) statt. Aufgrund des interdisziplinären Themenschwerpunkts im Bereich der Sensorik, der Informatik, der Anwendung von Industrie 4.0, Robotik oder Umgebungszintelligenz eignet sich diese Konferenz sehr gut, um dort das Projekt und die erzielten Ergebnisse zu präsentieren.

Darüber hinaus ist vorgesehen ein peer-reviewtes Paper mit dem Schwerpunkt eines Multi-Agent Path Finding Algorithm (MAPF) für mobile Roboter mit unterschiedlich geometrischem Footprint in einer dynamischen, industriellen Umgebung einzureichen.

12 Verzeichnisse

12.1 Literaturverzeichnis

- [SHARKEY 06a] Sharkey, A. & Sharkey, N. The Application of Swarm Intelligence to Collective, 2006a. Robots, Advances in Applied Artificial Intelligence p. 157.
- [SHARKEY 06b] Sharkey, A. Robots, Insects and Swarm Intelligence, Artificial Intelligence Review. 2006b 26(4): 255–268.
- [YOGESWAREN 10] Yogeswaren, M. Ponnambalam, S. Swarm Robotics: An Extensive Research Review. 2010
- [STEELE 07] Steele Jr, F. & Thomas, G. Directed stigmergy-based control for multi-robot systems, Proceedings of the ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction, 2007: ACM, p. 230.
- [QUINLAN 86] Quinlan, J. Induction of decision trees, Machine learning 1986 1(1): 81-106.
- [MITCHELL 97] Mitchell, T. & Mitchell, T. Machine learning, McGraw-hill series in computer science. 1997
- [SIM 03] Sim, S., Ong, K. & Seet, G. A Foundation for Robot Learning. 2003 The Fourth International Conference on Control and Automation, pp. 10-12.
- [POMERLEAU 90] Pomerleau, D. Neural network based autonomous navigation, Vision and Navigation. 1990. The Carnegie Mellon Navlab pp. 83-93.
- [ALPAYDIN 04] Alpaydin, E. Introduction to machine learning. 2004. The MIT Press:
- [FERNANDEZ 05] Fernandez, F., Borrajo, D. & Parker, L. A reinforcement learning algorithm in cooperative multi-robot domains. 2005. Journal of Intelligent and Robotic Systems 43(2): p.161-174.
- [CHOROWSKY 19] Chorowsky u. a. Unsupervised speech representation learning using WaveNet autoencoders, 25. Januar 2019, Cornell University
- [RAM 94] Ram, A., Boone, G., Arkin, R. & Pearce, M. 1994. Using genetic algorithms to learn reactive control parameters for autonomous robotic navigation, Adaptive Behavior 2(3): 277.

12.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vision von RoboCoop in der Anwendung der Kabinenausstattung.....	3
Abbildung 2 Projektstruktur des Verbundvorhabens RoboCoop.....	6
Abbildung 3: Arbeits- und Zeitplan des Verbundvorhabens RoboCoop	7
Abbildung 4: Schwarmintelligenz in der Natur	8
Abbildung 5: Matrixproduktion: Die Produktion von morgen.....	10
Abbildung 6: exemplarische Standardzelle in der Matrix-Produktion.	11
Abbildung 7 Navigationspfad in der Forschungshalle Ebenen 1 (links) und Ebene 2 (rechts).....	19
Abbildung 8: Fähigkeitenkonzept der Plattform Industrie 4.0	20
Abbildung 9: Schematische Darstellung der Prozessmanagement-Architektur	21
Abbildung 10: Frontend-Dashboard zur Visualisierung der Prozesse und Ressourcen.....	22
Abbildung 11 modularer Aufbau einer mobilen Produktionseinheit	25
Abbildung 11: Übersicht modulares Konzept 'steckbare Stand-Alone-Beine'	29
Abbildung 12: modulares Gesamtsystem RoboCoop.....	30
Abbildung 13: Lift.....	32
Abbildung 14: Arbeitsmodul Roboter	33
Abbildung 15: Bauteilaufnahme Großbauteil	35
Abbildung 16: Stand-Alone-Modul.....	36
Abbildung 17: Ablagestation für ein Stand-Alone-Modul	37
Abbildung 18: Ablagemodul	38
Abbildung 19: Übersicht der Schnittstellen vom Arbeitsmodul.....	39
Abbildung 20: Übersichtschaubild Steuerung des Arbeitsmoduls	40
Abbildung 21: Modularität und Hardwareschnittstellen im Gesamtaufbau.....	41
Abbildung 22: Detaildarstellung der Schnittstelle zwischen AGV und Arbeitsmodul	42
Abbildung 23: Schnittstelle zwischen Arbeitsmodul und SAM	43
Abbildung 24: Nav2 Architektur.....	46

Abbildung 25: Formation von Robotern mit einem virtuellen Leader	48
Abbildung 26: Architektur der Formationssteuerung mit virtuellem Leader	48
Abbildung 27: Autonome Navigation der Formation	49
Abbildung 28: Gesamtregelkreis des Formationsreglers im autonomen Navigationsmodus	49
Abbildung 29: Autonome Navigation mit Hindernisvermeidung in Rviz.....	50
Abbildung 30: Autonome Navigation mit Hindernisvermeidung	50
Abbildung 31: Ablagestationen geplant (Arbeitsmodul links, SAM rechts).....	52
Abbildung 32: Ablagestationen umgesetzt (links mit abgelegten Arbeitsmodul).....	53
Abbildung 33: Ablagestation für SAM-Beine umgesetzt (oben: frontal, unten: seitlich).....	54
Abbildung 34: Robotermodul geplant (oben), AGV mit Lift (unten), SAM-Beine (seitlich).....	55
Abbildung 35: AGVs mit Lift-Modulaufbauten	55
Abbildung 36: Innerer Aufbau des Liftmoduls.....	56
Abbildung 37: Arbeitsmodul mit SAM-Beinen.....	56
Abbildung 38: Übersichtsplan der Orte in der Forschungshalle	58

12.3 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Tasksequenz des "AssembleSystem_CarrierSystem"	24
Tabelle 2: Systementwürfe aus der Konzeptphase.....	28

13 Durchführende Forschungsstelle

Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung (IFAM)
Außenstelle Stade – Automatisierung und Produktionstechnik

Abteilung Montagetechnologien

Ottenbecker Damm 12
21684 Stade

Leiter der Forschungsstelle: Prof. Dr. rer. nat. Bernd Mayer
Projektleiter: Björn Reichel

Stade, den 30.06.2024