

Schlussbericht vom 31.08.2023

zu IGF-Vorhaben Nr. 21839 N

Thema

Ressourcenbezogene Prozessverwaltung durch flexible Nutzung intelligenter Module in der hybriden Montage

Berichtszeitraum

01.06.2021 bis 31.05.2023

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Elektrotechnik beim ZVEI e.V. - FE

Forschungseinrichtung(en)

Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH (BIBA) Hochschulring 20 28359 Bremen

Gefördert durch:

Inhalt

Zusammenfassung.....	3
1 Einleitung	4
1.1 Problemstellung	4
1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse	4
1.3 Projektziele	5
2 Lösungsweg.....	5
3 Gegenüberstellung der durchgeföhrten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen	6
3.1 AP 1: Anforderungsanalyse und Systemspezifikation.....	6
3.2 AP 2: Entwicklung Hardware	17
3.3 AP 3: Entwicklung Software	26
3.4 AP 4: Umsetzung der Anwendungsszenarien.....	40
3.5 AP 5: Test und Optimierung	47
3.6 AP 6: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit.....	51
4 Verwendung der Zuwendung	51
5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	51
6 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse	51
7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	52
7.1 Durchgeföhrte Transfermaßnahmen	52
7.2 Geplante Transfermaßnahmen	54
7.3 Einschätzung der Realisierbarkeit dieses Transferkonzepts.....	55
8 Literaturangaben	55

Zusammenfassung

Die Baugruppenmontage, als zentrales Element in der industriellen Fertigung, verlangt aufgrund ihrer erheblichen Auswirkungen auf die Gesamtproduktionszeit und -kosten nach stetigen Optimierungen. Vor dem Hintergrund steigender Produktindividualisierung, größerer Variantenvielfalt und geringerer Losgrößen, sowie sich wandelnder Marktanforderungen, stellt die effiziente und wirtschaftliche Fertigung eine zentrale Herausforderung dar. Insbesondere kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sehen sich mit betriebs- und kostenintensiven Hürden bei der Einführung flexibler Montagesysteme konfrontiert.

Das Projekt PassForM hatte die Flexibilisierung und Modularisierung von Systemen für die Montage von Produkten mit geringer Stückzahl zum Ziel. Es fokussierte sich auf die Entwicklung einer modularen, teilautonomen und rekonfigurierbaren Montagestation, die durch die Integration intelligenter Module eine schrittweise Anpassung des Montageautomatisierungsgrades ermöglicht. Diese innovative Lösung ermöglicht einen dynamischen Wechsel zwischen manueller, kollaborativer und vollautonomer Montage, was besonders im Bereich mittlerer Stückzahlen eine höhere Flexibilität und erhebliche wirtschaftliche Vorteile verspricht.

Im Rahmen des Projekts wurden standardisierte Elemente für modulare Montagelösungen entwickelt und im Kontext der Kleinserienmontage erprobt. Die Lösung präsentiert sich als modularer Montagearbeitsplatz, der aus einem zentralen Tisch zur Systemverwaltung und individuellen Modulen zur Ausführung von Montagetätigkeiten besteht. Das Design orientiert sich an klassischen Montagetischen, wodurch hybride Montageprozesse, bestehend aus manuellen und autonomen Tätigkeiten, abgebildet werden können.

Die Lösung basiert auf einem einheitlichen Katalog von Montagetätigkeiten zur Beschreibung von Montageprozessen und einer umfangreichen Softwarebibliothek zur Programmierung neu entwickelter Module. Diese Ergebnisse erleichtern kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) sowie anderen interessierten Anwendern die Übertragung der Ergebnisse in ihre eigenen Lösungen. Die Einbindung in existierende Frameworks wie RAMI 4.0, BaSys 4.0 und die Verwaltungsschale sowie die Nutzung bestehender Softwarebibliotheken wie ROS2 und BaSyst verbessern die Integrierbarkeit in bestehende Lösungen. Leitfäden zur Nutzung und Weiterentwicklung der Ergebnisse vereinfachen den Transfer.

Das Forschungsziel wurde erreicht.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Baugruppenmontage nimmt einen entscheidenden Platz in der industriellen Fertigung ein und verursacht über 50% der Gesamtproduktionszeit sowie 20% der Gesamtproduktionskosten [1]. Daher bergen Verbesserungen in den Montageprozessen erhebliche wirtschaftliche Potenziale. Die zunehmende Produktindividualisierung, verbunden mit größerer Variantenvielfalt und geringeren Losgrößen, stellt zusammen mit sich ändernden Marktanforderungen eine zentrale Herausforderung für die zukünftige Profitabilität und internationale Wettbewerbsfähigkeit von Unternehmen dar.

Effiziente und wirtschaftliche Fertigung, basierend auf den Zielkriterien Kosten, Produktqualität und Reaktionsfähigkeit auf Marktveränderungen [2], erfordert eine Steigerung der Flexibilität von Montagesystemen. Besonders für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sind Investitionskosten und Flächenbedarf entscheidende wirtschaftliche Faktoren bei der Einführung flexibler Montagesysteme. Bisher wurden Flexibilität vor allem durch redundante Fertigungsstationen oder hochintegrierte Spezialmaschinen erreicht, was jedoch für KMU erhebliche Investitions- und Betriebskostenrisiken darstellt.

Dies gilt branchenübergreifend für die Montage von Produkten mit mittlerer Stückzahl und hoher Variantenvielfalt, bei der eine wirtschaftliche vollständige Automatisierung nicht möglich ist [3]. In diesen Bereichen erfordert oft ein kontinuierlicher Wechsel von Verbrauchsmaterialien und Werkzeugen entweder eine vollständig manuelle Fertigung oder die Bereitstellung komplexer automatischer Fertigungsstationen, die jedoch nur gering ausgelastet sind.

Die Einführung einer modularen, teilautonomen und rekonfigurierbaren Montagestation, wie sie in diesem Projekt erforscht wurde, führt zu Produktunabhängigkeit. Durch die Ausstattung dieser Station mit verschiedenen intelligenten Modulen kann der Montageautomatisierungsgrad schrittweise erhöht und an Bedarf und Marktanforderungen angepasst werden. Ein dynamischer Übergang zwischen manueller, kollaborativer und vollautonomer Montage ermöglicht die Vereinigung der oft gegensätzlichen Anforderungen von Produktivität und Flexibilität, besonders im Bereich mittlerer Stückzahlen. Im Vergleich zu einem starren Aufbau bringt dies für die genannten Anwendungsfelder eine deutlich höhere Flexibilität und erhebliche wirtschaftliche Vorteile.

1.2 Wirtschaftliche Bedeutung der angestrebten Forschungsergebnisse

Eine effiziente Fertigung unter den oben genannten Rahmenbedingungen erfordert einen Wandel von der traditionellen produktorientierten zur prozessorientierten Systemkonzeption [4]. Bisher diktieren Produktanforderungen dem Produktionssystem entsprechende Vorgaben, was zu komplexen Sondermaschinen für die Montage spezifischer Produkte führt, welche nach dem Ende des Produktlebenszyklus nicht wiederverwendet werden können. Die Einführung neuer Produkte oder Varianten erfordert den Einsatz neuer Stationen, was bei kürzeren Produktlebenszyklen zu regelmäßigen hohen Investitionen führt.

Im prozessorientierten Ansatz hingegen folgt die Produktentwicklung den verfügbaren Prozessen und den mit diesen Prozessen verbundenen Modulen. Somit sind für neue Produkte nur dann neue Module zu entwickeln, wenn gänzlich neue Prozesse abzubilden sind. Diese Module können dann später für diese Prozesse wiederverwendet werden [4] (siehe Abbildung 1).

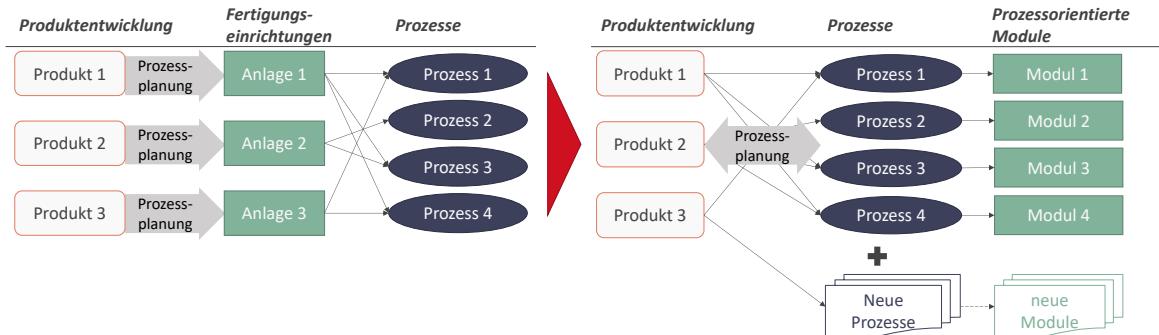


Abbildung 1: Wandel vom produktorientierten (links) zum prozessorientierten Systemdesign (rechts), in Anlehnung an [4]

Durch den Einsatz modularer und flexibler Montagestationen, welche auf dem Konzept der prozessorientierten Systementwicklung basieren, lassen sich nicht wiederverwendbare, produkt spezifische Einrichtungen minimieren und somit wiederkehrende Investitionskosten reduzieren [6]. Die Möglichkeit des Modultauschs ohne Produktionsstillstände minimiert zudem die Rüstkosten.

Die angestrebte Entwicklung eignet sich für den branchenübergreifenden Einsatz in Montagebaugruppen, die trotz mittlerer Stückzahlen derzeit noch manuell gefertigt werden. Unternehmen, die solche flexiblen, modularen Montagesysteme einsetzen oder herstellen, erhöhen mittelfristig ihre Wettbewerbsfähigkeit vor dem Hintergrund steigender Montagekomplexität.

1.3 Projektziele

Das Forschungsziel des Projektes PassForM war die Entwicklung eines innovativen hybriden Montagesystems mit Fokus auf Modularität und Rekonfigurierbarkeit. Das System soll logische Funktionsmodule, darunter die Modulaufnahmefläche, Materialbereitstellungsmodul, Fördermodul und Robotermodul, integrieren. Ein zentrales Element ist ein dynamischer Digitaler Zwilling, der sich bei Modulkopplung automatisch erweitert und einen bidirektionalen Informationsaustausch ermöglicht. Dieses Konzept wird in das Prinzip der Verwaltungsschalen eingebunden.

Weitere Schwerpunkte sind die Entwicklung automatischer Kopplungs- und Arretierungsmechanismen für Montagestationen, einschließlich einheitlicher Hardware- und Softwareschnittstellen nach RAMI4.0. Forschungsbereiche umfassen auch die Anforderung von Modulen anhand produktgegebener Prozessfolgen und die Entwicklung von Methoden für den prozessbezogenen, dynamischen Wechsel zwischen manueller, hybrider und automatisierter Montage.

Das Projekt adressiert die Identifikation geeigneter Module, ihre Einsatzfähigkeit und Wirtschaftlichkeit für KMU. Die Einführung der Ergebnisse in KMU soll mittels Leitfäden und einer baukastenbasierten Lösung unterstützt werden. Abschließend erfolgt die Evaluierung der Leistungsfähigkeit des hybriden Montagesystems anhand eines variantenreichen Baugruppenmontageszenarios.

2 Lösungsweg

Der Lösungsweg des Projektes gliedert sich in fünf inhaltliche Arbeitspakete. Abbildung 2 stellt das Vorgehen schematisch dar.

Im Austausch mit potenziellen Anwendern wurden in Arbeitspaket 2 (AP 2) zunächst Anforderungen aufgenommen und darauf aufbauend Konzepte für die Systemgestaltung und Montageprozessdarstellung entwickelt. Diese bilden die Grundlage für die darauffolgende Entwicklung der

Hardware, bestehend aus den Modulen und der dazugehörigen Aufnahme, den Verbindungselementen und der Systembasis. Parallel wurde in AP 3 ein geeignetes Softwareframe für die Kommunikation zwischen den Modulen und hin zum Menschen, sowie den erweiterbaren Digital Zwilling. Schwerpunkt dieser Entwicklung lag in der Wiederverwendbarkeit der Lösung und der Nutzung existierender Systeme. Der Aufbau des Systems und die Integration der einzelnen Lösungskomponenten in AP 4 stellt die Basis für abschließende Tests und Optimierungen in AP 5.

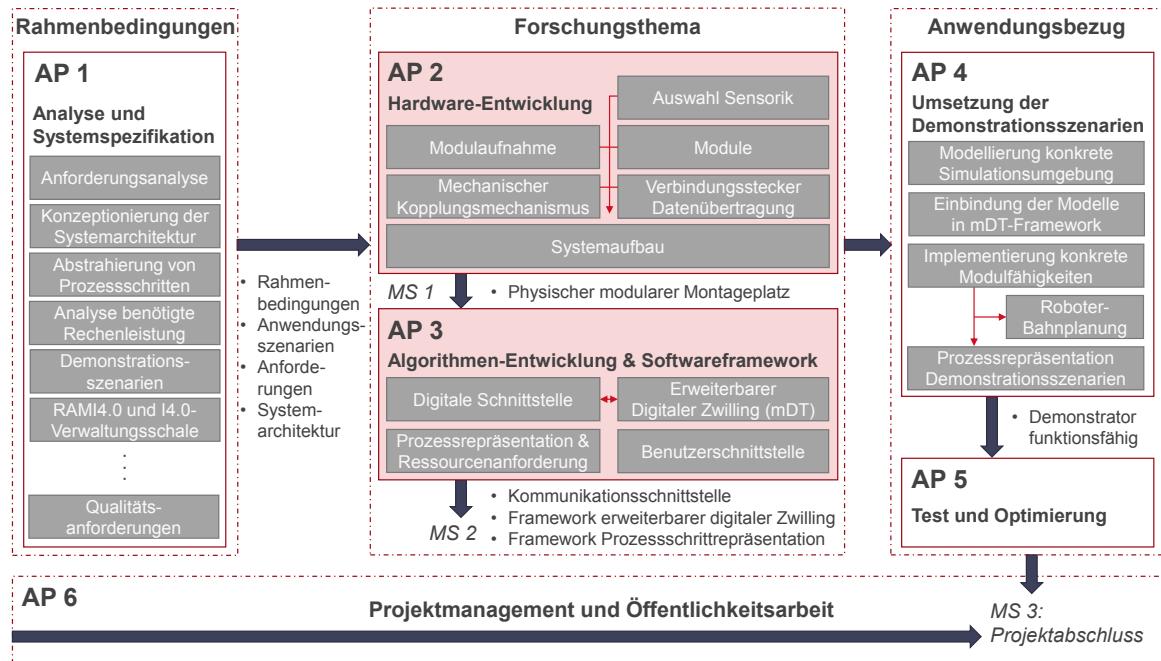


Abbildung 2: Lösungsweg des Vorhabens *PassForM*

3 Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten und des Ergebnisses mit den Zielen

3.1 AP 1: Anforderungsanalyse und Systemspezifikation

Ziele

Dieses Arbeitspaket bildet den Rahmen für die technischen Projektinhalte. Ziel des APs ist es, die umzusetzenden Anwendungsszenarien (Baugruppenmontage von Lampen für die maritime Industrie, siehe oben, sowie Baugruppenmontage bei einem Kundenunternehmen eines weiteren PA-Mitglieds) zu analysieren, Anforderungen an die Hardware- und Softwarekomponenten zu ermitteln sowie eine Konzeptionierung und Spezifikation des Systems abzuleiten. Zudem erfolgt die Identifikation von konkreten Prozessschritten und die Abstraktion von Prozessfolgen sowie die Entwicklung eines Leitfadens für KMU. Ausgehend von den Anforderungen erfolgt eine Grobkonzeptionierung der Systemarchitektur.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Als Grundlage für die Anforderungen an das entwickelte System und seine individuellen Komponenten wurden zunächst Montage- und Handhabungsprozesse bezüglich der durchzuführenden Tätigkeiten untersucht. Darauf aufbauend wurde eine Literaturanalyse zu rekonfigurierbaren Fertigungssystemen (RFS) und rekonfigurierbaren Montagesystemen (RMS) sowie Workshops gemeinsam mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) durchgeführt. Im Rahmen von drei Ter-

minen wurde dabei sowohl die Anwenderperspektive als auch die technische Dimension der Lösung betrachtet. In zwei weiteren Workshops wurden zusätzlich Hürden in der Zusammenarbeit von Mensch und Technik in kollaborativen Systemen erarbeitet.

Montageprozessanalyse

Grundlegende Anforderungen an die entwickelte Lösung ergeben sich aus den durchzuführenden Tätigkeiten, welche eine Basis für die Fähigkeiten der Module und Anforderungen an das System stellen. Hierfür wurden potenziell zu montierenden Bauteilen und –gruppen analysiert und die enthaltenen Tätigkeiten mit Taxonomien aus der Literatur verglichen.

In der Literatur existiert eine Vielzahl an Modellierungsansätzen zur Beschreibung von Bewegungsfolgen. Sie unterscheiden sich unter anderem in der Art der betrachteten Ausführung (manuell, automatisch, interaktiv) und dem beabsichtigten Ziel der Analyse (Planung von Montageprozessen, Optimierung der Tätigkeit, Programmierung von Maschinen). Die meisten Ansätze sind den *Systemen vorbestimmter Zeiten* zuzuordnen und betrachten hauptsächlich Tätigkeiten des Menschen aus zeitlicher Perspektive mit dem Ziel der Montageplanung und –optimierung. Wichtigste Vertreter sind hier das Methods-Time Measurement (MTM) mitsamt seiner Ausprägungen, wobei insbesondere MTM-UAS für die Montagebeschreibung zu erwähnen ist [5, 6]. Weitere Ansätze sind RTM [7], MODAPTS [8, 9], MOST [10, 11] mitsamt seiner Erweiterung für robotische Tätigkeiten [12], sowie GATM [13, 14]. Insbesondere MTM-UAS wird auch für die Planung von Montagesystemen herangezogen und vor dem Hintergrund hybrider Systeme auch auf robotisch ausgeführte Tätigkeiten übertragen [15 bis 17]. Zur weiteren Spezifizierung von Tätigkeiten greifen viele Ansätze dabei zusätzlich auf Normen für die Handhabung [18] und das Fügen [19] zurück.

Die Programmierung von Robotern in der Montage geschieht zumeist spezifisch bezogen auf individuelle Tätigkeiten, wobei hier zwischen positions- und kraftgesteuerten Bewegungen unterschieden wird [20 bis 22]. Da demonstrations-basierten Ansätze zur Programmierung (*Learning from Demonstration*) eine roboterspezifische Lösung von Aufgaben entwickeln, werden sie hier nicht betrachtet [23]. Einige Ansätze verbinden das Konzept einer allgemeinen Montagebeschreibung mit programmierverständlichen Beschreibungen, wobei diese zumeist nur ein Grundgerüst für die Definition von Tätigkeiten der Montage darstellen [24, 25].

Die Tätigkeiten der identifizierten Modellierungsansätze wurden bezüglich ihrer Gemeinsamkeiten und Unterschiede analysiert. Die zunächst gewählten Tätigkeiten stellen die Vereinigungsmenge der identifizierten Ansätze dar. Diese Prozessschritte wurden in Demonstrationsszenarien auf allgemeine Prozessfolgen übertragen. Hierfür wurden vier Montageprozesse (zweimal die Montage kleiner mechanischer Bauteil, eine elektrische Schaltgruppe und eine zusammenge setzte Baugruppe) und ein Handhabungsprozess betrachtet. Hierbei erweist sich insbesondere MTM-UAS als geeignete Beschreibungsmethode. Abbildung 3 zeigt die identifizierten Tätigkeiten und ihr Vorkommen je Modellprozess gemäß dieses Ansatzes. Grundtätigkeiten der Handhabung (Greifen (*get*), Platzieren (*place*), und Bewegen (*motion sequence*)) decken einen Großteil der Tätigkeiten ab. Weitere häufige Prozesse sind aus dem Kontext des Fügens, welche durch Werkzeugtätigkeiten abgebildet sind (*handle tool*). Sämtliche analysierten Prozesse sind manuell und wurden vor dem Hintergrund der Montagetätigkeit analysiert. Vor dem Hintergrund der Ausführung durch Roboter und entsprechende Koordination mit dem Menschen scheinen diese Prozesse jedoch hilfreich.

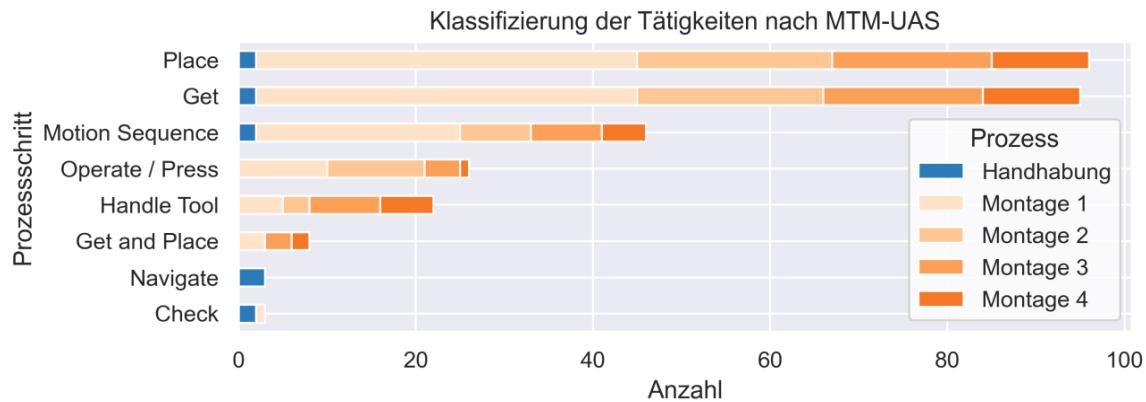


Abbildung 3: Verteilung der Prozessschritte über die Demonstrationsszenarien.

Anforderungsanalyse

Im Rahmen einer Literaturanalyse über den Entwurf und die Gestaltung von RFS wurden wichtige Systeme Aspekte dieser Systeme gesammelt. Grundsätzliche Merkmale von RFS sind Modularität, Integrierbarkeit, Anpassung, Konvertierbarkeit, Diagnostizierbarkeit und Skalierbarkeit [2, 26 bis 28]. Literatur zu RFS konzentriert sich dabei insbesondere auf Modularität und Skalierbarkeit [29]. Tabelle 1 enthält eine Liste der Hauptmerkmale von RMS.

Tabelle 1: Merkmale von rekonfigurierbaren Fertigungssystemen und ihre Beschreibung (aufbauend auf [29])

Merkmal	Beschreibung
Modularität	Die Unterteilung von Betriebsfunktionen in Einheiten, die zwischen alternativen Produktionssystemen für eine optimale Anordnung manipuliert werden können.
Integrierbarkeit	Die Fähigkeit, Module schnell und genau durch einen Satz von mechanischen und informationstechnischen Mitteln zu kombinieren, um die Integration und Kommunikation zu erleichtern.
Anpassung	Die Leistung und Flexibilität des Systems sind an die Anwendung angepasst.
Konvertierbarkeit	Die Fähigkeit, die Funktionalität bestehender Systeme und Maschinen schnell an neue Produktionsanforderungen anzupassen.
Diagnostizierbarkeit	Die Fähigkeit, den aktuellen Zustand eines Systems zu beurteilen, um die wichtigen Ursachen von Produktmängeln zu erkennen und zu diagnostizieren und betriebliche Mängel umgehend zu beheben.
Skalierbarkeit	Die Fähigkeit, die Produktionskapazität schnell zu ändern, indem man Fertigungsressourcen (z.B. Maschinen) hinzufügt oder entfernt und/oder Komponenten des Systems ändert.

Diese Idee der Rekonfigurierbarkeit wurde schnell auf Montagesysteme übertragen [30 bis 32], für die weitere Schwierigkeiten und Anforderungen identifiziert wurden [2, 33, 34]. Wichtige Aspekte bei der Gestaltung von RMS sind die enge physikalische Kopplung durch Förder- und Transfersysteme [28, 33] sowie die Empfindlichkeit von Montagesystemen gegenüber Änderungen der Prozesszeit, der Prozessreihenfolge oder dem Hinzufügen neuer oder geänderter Prozesse [33]. Anstelle einer einfachen Rekonfiguration werden autonome mobile Roboter (AMR)

Förderanlagen ersetzen und RMS um zusätzliche Fähigkeiten und Arbeitskapazitäten erweitern [32, 35]. Es ist wichtig zu beachten, dass Veränderbarkeit und damit Flexibilität auf allen Ebenen der Fabrik erreicht werden kann; von der einzelnen Station, die einzelne Aktionen durchführt, über die Zelle, die aus mehreren Stationen besteht, bis hin zum System oder sogar ganzen Segmenten, Fabriken oder Netzwerken [30]. Im Zusammenhang mit RMS kann Flexibilität insbesondere auf der Zellebene erreicht werden, indem Stationen hinzugefügt oder entfernt werden oder die Beziehungen zwischen Stationen innerhalb einer Zelle geändert werden [34]. Die Modularität auf dieser Ebene bietet eine kontinuierliche Steigerung des Kosten-Nutzen-Verhältnisses von Montagestationen [5]. Um dieses Maß an Flexibilität auf Zellebene zu erreichen, kann jede Maschine als austauschbares Modul betrachtet werden, was den Bedarf an einfacher Integration und Programmierung einzelner Arbeitsstationen [33, 35], einer genau definierten Spezifikation von Modulen und Schnittstellen [27], sowie der Integration verschiedener Robotertypen und der Zusammenarbeit von Mensch und Maschine erhöht [2, 35].

Die Literatur beschreibt verschiedene Merkmale, um Rekonfigurierbarkeit zu erreichen und Systeme als RFS oder RMS zu betrachten. Wie bereits erwähnt, besteht keine Einigkeit über die notwendigen oder wesentlichen Merkmale, jenseits von Modularität und Skalierbarkeit [29]. Weitere Anforderungen an RMS aus der Literatur zielen explizit auf Transportsysteme [28, 33], fähigkeitsbasierte Steuerung [33], kollaboratives Arbeiten von Mensch und Maschine [2, 35] und den modularen Austausch einzelner Stationen innerhalb einer Zelle über einfache Schnittstellen [27, 33, 35]. Um diese Anforderungen weiter zu spezifizieren wurden Workshops mit dem PA durchgeführt, die sowohl die Benutzerperspektive als auch die technische Dimension der Lösung berücksichtigten. Zusätzlich wurden Hürden in der Zusammenarbeit von Mensch und Technik in kollaborativen Systemen herausgearbeitet und Lösungsansätze abgeleitet.

Anforderungsworkshops

In zwei Workshops wurden gemeinsam mit technisch vertrautem Personal aus den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses potenzielle Hürden bei der Umsetzung der angestrebten Lösung ermittelt. Entsprechend der Expertise der Personen wurden die Workshops nach *Software* und *Hardware* getrennt durchgeführt. Der Aufbau beider Workshops war ähnliche und zielte auf die Identifikation zu berücksichtigender Anforderungen und potenzieller Herausforderungen ab. Als ersten Schritt haben die Teilnehmenden anhand der konzeptionellen Darstellung des Systemkonzepts aus dem Antrag (Abbildung 4) individuell kritische Stellen im Aufbau bezeichnet. Nach einer Gruppendiskussion markiert jede Person die zwei Probleme, die sie persönlich als am wichtigsten empfindet.

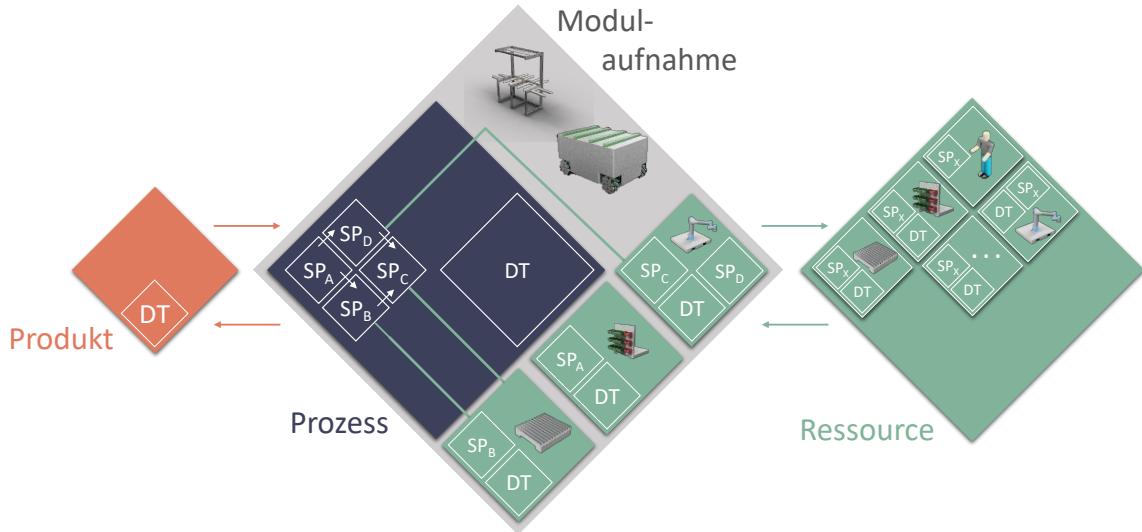


Abbildung 4: Konzeptionelle Darstellung des geplanten Systems gemäß Antrag. Produkt-Prozess-Ressource Darstellung in Anlehnung an [36].

Beide Gruppen haben der *Schnittstellen* zwischen den Modulen eine hohe Wichtigkeit zugesprochen. Hierzu gehören sowohl Anforderungen an die Übertragung von Daten und Modulinformationen sowie wie sichere Schaltung der Module als auch Fragen bezüglicher der physischen Ausgestaltung aufgrund verschiedener Steckersysteme. Weitere Anforderungen beziehen sich auf die mechanische Gestaltung der Module aufgrund des Wechselmechanismus. Hier ist zu beachten, dass Toleranzen zwischen den Modulen und hohe wirkende Kräfte die Prozessgenauigkeit negativ beeinflussen. Ebenso ist die elektrische Last aufgrund verketteter Module ein Punkt, der bei der Auslegung der Aderquerschnitte und Sicherungsautomaten berücksichtigt werden muss. Die Gestaltung der Steuerung der Module und damit die Verteilung der Intelligenz im System sowie die Vorhersage der Taktzeit bei der automatischen Ausführung des Prozesses sind weitere identifizierte Probleme. Die folgenden Anforderungen wurden identifiziert:

- Schnittstelle
 - Daten
 - Universalität der Schnittstelle / Beschreibung der Funktionalität der Module
 - Anbindung proprietärer Schnittstellen
 - Integration anderer Module über offene Schnittstellen
 - Sicherheit
 - Überwachung der Sicherheit
 - Handshake zwischen den Modulen
 - Stecker
 - Hohe Anzahl unterschiedlicher Steckersysteme
 - Hot-Plug-Fähigkeit (Stecken unter Last)
- Hardware
 - Mechanik
 - Prozessbeeinflussende Toleranzen zwischen den Modulen
 - Unterschiedliche Gewichte der Module / Kräfte zwischen den Modulen
 - Elektrik
 - Vermeidung einer elektrischen Überlast bei verketteten Modulen

Neben technischen Anforderungen wurden weiterhin Anforderungen durch die Bedienenden ermittelt. Hierfür wurden einerseits Interviews über die die Bedienenden und ihre Aufgaben sowie über generelle Probleme in der Mensch-Technik-Interaktion durchgeführt. Die Hauptaufgaben des Personals sind Überwachung und Fehlerbehebung im laufenden Betrieb. Zukünftige Trends deuten darauf hin, dass die reine Ausführung von Montageaufgaben weniger wichtig wird, während der Eingriff in komplexe Prozesse an Bedeutung gewinnt. Es wird erwartet, dass Menschen mittelfristig vor allem als Überwachende agieren, wobei enge Kooperation zwischen Mensch und Maschine entscheidend ist. Potenzielle Probleme begründen auf einem Mangel an Verständnis, Aufmerksamkeit und Vertrauen, oft aufgrund von Entwicklungsfehlern wie Missachtung menschlicher Anforderungen. Dies führt zu mangelndem Training, schlechter Ergonomie und kognitiver Überforderung. Daher besteht ein hoher Bedarf an ergonomischen Entwicklungskriterien, die Verständnis, Aufmerksamkeit und Vertrauen betonen. Betriebsbedingte Probleme betreffen Ausfälle von Komponenten oder Systemsteuerungsschwierigkeiten, insbesondere bei automatisierten Systemen. Ursachen hierfür sind oft unerwartete Situationen oder schlechtes Verhalten in Notsituationen. Für die Entwicklung ist daher insbesondere die Überwachungs- und Fehlerbehebungsfunktion des Personals entscheidend, wobei der Umgang mit widersprüchlichen Signalen und potenziellen Fehlersituationen, bedingt durch externe Einflüsse oder unklare Steuersignale, besonders berücksichtigt werden sollte.

Neben der Perspektive des Bedienpersonals ist auch die des Betreibers wichtig für den Einsatz eines modularen Montagearbeitsplatzes. Gemeinsam mit Entwickler*innen, Vertriebler*innen und potenziellen Kund*innen von Montagearbeitsplätzen wurde im Rahmen von Kreativ-Workshops zunächst Verständnis für die Perspektive des Betreibers entwickelt. Dafür wurden die Aufgabe, aktuelle und mögliche *Pains* und *Gains* sowie externe Einflüsse und interne Gefühle analysiert. Darauf aufbauend wurden durchzuführenden Aufgaben und dazugehörige Probleme identifiziert und durch die Teilnehmenden in Form von Anforderungen gruppiert sowie gewichtet. Die Aufgabe des Betreibers ist aus Perspektive der Teilnehmenden die *Fertigung und Montage von Produkten mit Gewinnerzielungsabsicht* und der gleichzeitigen *Bereitstellung einer für Mitarbeitende zufriedenstellenden Arbeitsumgebung*. Darauf aufbauend haben die Teilnehmenden Wünsche, Ziele und akute Hindernisse identifiziert und gruppiert. Aus dem naheliegenden Ziel der Gewinnsteigerung und erhöhten Wertschöpfung ergibt sich der Wunsch nach Produktvielfalt und optimierten Prozessen. Daraus folgen drei Kategorien an Anforderungen mit entsprechenden Hindernissen:

- Schnelle (und automatische) Umrüstung der Arbeitsplätze
 - Maschinen müssen aufwändig neu eingerichtet werden
 - Platz ist begrenzt und reicht für Magazine u.ä. reicht nicht aus
- Rechtzeitige Bereitstellung von Komponenten und Betriebsmitteln
 - Platz an Maschine ist begrenzt
 - Teile werden fehlgeleitet
 - Material ist nicht verfügbar
- Ergonomische Arbeitsplätze / Zufriedenstellung der Mitarbeitenden
 - Tätigkeit besteht aus der Handhabung hoher Gewichte
 - Tätigkeit ist kompliziert und filigran
 - Platz ist begrenzt

Abschließend wurden die von den Nutzer*innen und Fachleuten genannten Anforderungen mit den mit Erfahrungen aus der Literatur kombiniert. Tabelle 2 listet diese gesammelten Anforderungen und stellt einen Bezug zu den Kerneigenschaften von RFS her.

Tabelle 2: Anforderungen an ein rekonfigurierbares Montagesystem und ihre Entsprechung an die Kerneigenschaften rekonfigurierbarer Fertigungssysteme [37]

#	Anforderung	Merkmal
1	Spezifische Module für spezifische Aufgaben	Anpassung
2	Hot-Plug (Plug-and-Produce) von Modulen	Konvertierbarkeit, Skalierbarkeit, Integrierbarkeit
3	Schnelle Kalibrierung von Modulen	Konvertierbarkeit
4	Schneller (und automatischer) Modulwechsel	Konvertierbarkeit
5	Identische Schnittstellen für jedes Modul	Skalierbarkeit, Modularität
6	Fähigkeitsbasierte Steuerung	Modularität
7	Robuste mechanische Steifigkeit und elektrische Dimensionierung von Schnittstellen	Integrierbarkeit
8	Standardisierte Schnittstellen in Hardware und Software	Integrierbarkeit
9	Handshake und Überwachungsschaltungen (Watchdogs) zwischen Modulen	Diagnostizierbarkeit
10	Integration von Modulen und System in die Werkstatt- und Produktionsplanung	Diagnostizierbarkeit
11	Sichere Verbindung von Modulen	Diagnostizierbarkeit
12	Ergonomisches Design des Systems	Integrierbarkeit

Systemspezifikation und Grobkonzeption der Systemarchitektur

Grundlegender Aufbau

Das Gesamtkonzept wurde anhand der zuvor diskutierten Ansätze und Anforderungen (siehe Tabelle 2) entwickelt. Das System orientiert sich an dem Layout klassischen und bewährten Arbeitsplätzen in Tischbauweise. Auf diese Weise können Mensch und Maschine hybride Prozesse in verschiedenen Konfigurationen abwickeln, ohne die ergonomische Arbeitsplatzgestaltung (Anforderung 12) zu vernachlässigen, die eine zentrale Anforderung an praktisch alle manuellen Montagesysteme ist [38]. Es besteht aus einer feststehenden Basiseinheit (Zelle) und - im Gegensatz zu konventionellen Arbeitsplätzen - acht Einzelmodulen, die den Arbeitsplatz um funktionale Elemente erweitern (Anforderung 1). Die Basiseinheit versorgt die einzelnen Module mit Strom und stellt die Kommunikation innerhalb des Systems und nach außen zum Unternehmensnetzwerk sicher. Zur einfachen Konfiguration werden die Module in einen gemeinsamen Grundrahmen eingesetzt, um eine individuelle Umgebung für bestimmte Montageaufgaben zu schaffen. Der Rahmen aus stranggepresstem Aluminium bietet eine steife Struktur, um auftretende Kräfte zu absorbieren (Anforderung 7).

Standardisierte mechanische und elektrische Schnittstellen (Anforderung 5) zwischen Basis und Modulen reduzieren die Rüstzeit. Die geometrisch genau definierten Positionen im Sockel ermöglichen bei Bedarf eine schnelle und automatische Kalibrierung der Module (Anforderung 3). So

kann sich der Mensch auf die Wertschöpfung konzentrieren, z. B. auf Montageschritte, für die eine Automatisierung nicht in Frage kommt [39].

Für einen schnellen Wechsel (Anforderung 4) werden die Module mit Hilfe von Linearführungs- schienen in den Modulschacht des Rahmens geschoben. Nach dem Anschluss des Moduls an den Rahmen stellt ein Einplatinencomputer (SBC) im Inneren des Moduls eine Ethernet-Verbin- dung her und tauscht während des Handshake-Prozesses Konfigurationsinformationen aus. An- schließend gibt die zentrale Steuerung die Hauptstromversorgung des Moduls frei, wodurch die Hot-Plug-Funktionalität der Module ermöglicht wird (Anforderung 2). Um ein Modul zu entfernen, werden die Schritte in umgekehrter Reihenfolge durchgeführt. Alternativ zu den Handwagen kann auch eine automatische Lösung, z. B. ein FTS oder ein AMR, eingesetzt werden.

Systemarchitektur

Das entwickelte System verfügt über eine statische Basis und kann über einzelne Module pro- zessgetrieben mit Fähigkeiten erweitert werden (Anforderung 6, 8). Die Integration auf Modul- ebene folgt der Idee des "plug and produce" [40], bei dem ähnlich zu "plug and play" für Computerperipherie auch Montagmoduln einfach austauschbar sind, so dass nur ein kurzes Anhalten des Systems, der Modulwechsel und ein Neustart erforderlich sind, um die neuen Fähigkeiten in das System zu integrieren [40]. Damit verschiedene Module ähnliche Aufgaben erfüllen können, werden Fähigkeiten innerhalb eines strukturierten Rahmens definiert und von einer zentralen Ver- waltungsschicht verwaltet [40, 41]. Im Rahmen des Projektes PassForM bietet sich hier für die Verwaltungsschale (VWS) an. Weiterhin wird das RAMI 4.0 Referenzmodell aufgegriffen, um die einzelnen Elemente des modularen Montagearbeitsplatzes gemäß dieser Struktur im Kontext der Industrie 4.0 einzugliedern [42]. Abbildung 5 zeigt die Einordnung der verschiedenen Komponen- ten in das RAMI 4.0-Referenzmodell. Der Modulkern umfasst die grundlegenden Fähigkeiten des Moduls in den Schichten der Integration und des Assets. Grundlegende Kommunikationskanäle auf dieser Ebene verbinden den Tisch direkt mit dem Modulkern, wodurch eine robuste Übertra- gung sicherer Signale gewährleistet wird. Auf Informations- und Funktionsebene kommuniziert der Tisch mit der VWS um einerseits Eigenschaften und anderseits Tätigkeitsbeschreibungen des Moduls zu erhalten.

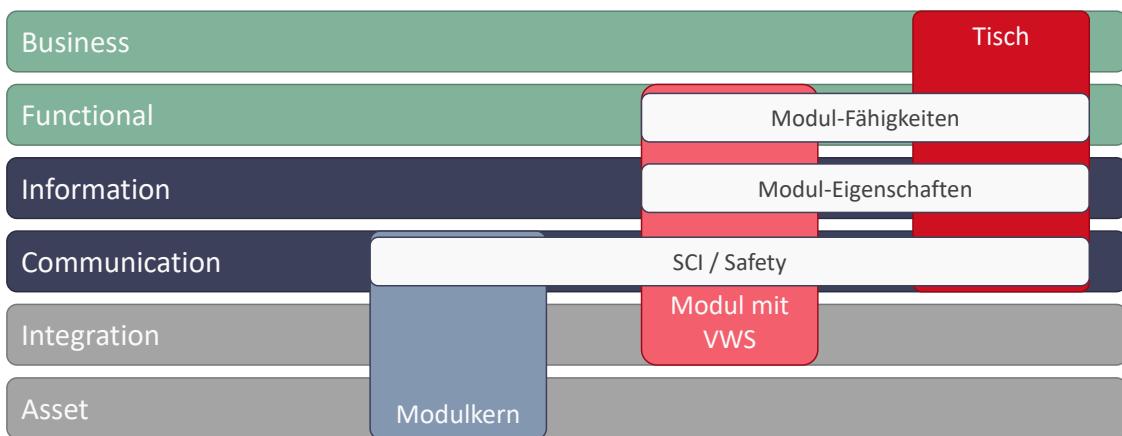


Abbildung 5: Einordnung der Modulkomponenten in das RAMI 4.0-Referenzmodell

Die Basis stellt entsprechend die Schnittstelle zwischen dem Unternehmen mit seiner Produkti- onsplanung und den im Betrieb befindlichen Modulen dar. Zur Steigerung der Interoperabilität der Module und zur Vereinfachung der Integration von Modulen von Drittanbietern wurde sich dazu

entschieden, bei den Modulen zwischen Kernmodul und Gateway zu unterscheiden. Das Kernmodul umfasst die grundlegenden Fähigkeiten des Moduls in den Schichten der Integration und des Assets. Dieser Kern wird mit einer Verwaltungsschale erweitert und auf diese Weise mit einheitlichen Schnittstellen versehen und in das interne Netzwerk des Montagearbeitsplatzes integriert [43] (Anforderung 5). Der Tisch als Basis kommuniziert auf Informations- und Funktionsebene mit dem Modul, um einerseits Eigenschaften und anderseits Tätigkeitsbeschreibungen des Moduls zu erhalten. Grundlegende Kommunikationskanäle auf Sicherheitsebene verbinden den Tisch direkt mit dem Modulkern, wodurch eine robuste Übertragung sicherer Signale gewährleistet wird (Anforderung 11).

Eine derartige Einordnung bietet den Vorteil, dass das PassForM-System als Teil komplexerer Systeme betrachtet und entsprechend integriert werden kann [44]. Dies ermöglicht es den PassForM-Tisch in weiteren Systemen gemäß den Produktionshierarchien nach [30] zu verordnen und etwa mit einer Prozessmodellierung auf Linienebene zu verbinden (Anforderung 10). Abbildung 6 zeigt eine entsprechende Integration des PassForM-Tisches in eine übergeordnete Produktionslinie, die weitere Funktionalitäten bereitstellt.

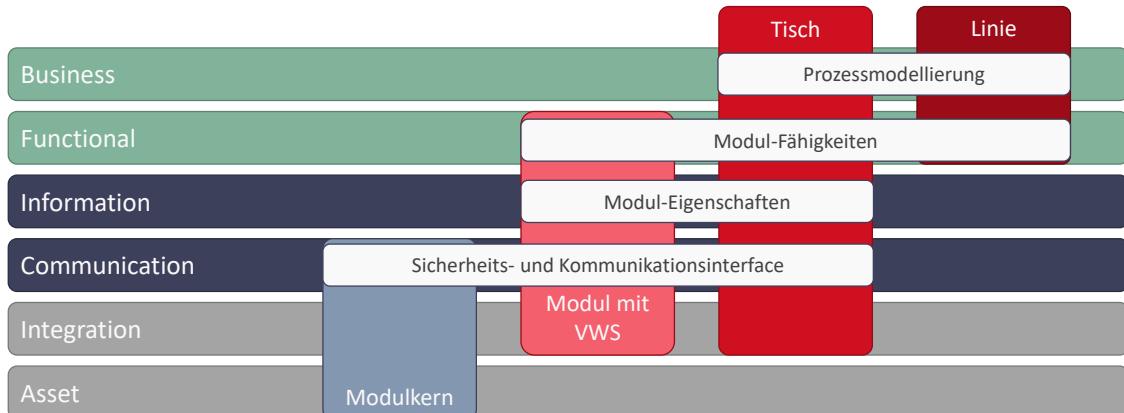


Abbildung 6: Einbindung des PassForM-Tisches in ein höheres System gemäß der Produktionshierarchie von [30]. Die Linie stellt ein komplexes Produktionssystem mit zusätzlich Modellierungs- und Steuerungsfähigkeiten auf Business-Ebene dar. Darstellung aus eigener Veröffentlichung [45]

Kommunikationsprotokoll

Eine wichtige Eigenschaft des Systems ist der schnelle und unkomplizierte Austausch individueller Module (Anforderung 4). Hierfür ist eine Kommunikationsarchitektur notwendig, die ohne Parametrieraufwand neue Teilnehmer im Netzwerk aufnehmen kann (Anforderung 2). Da die technische Implementierung der Tätigkeiten der Module nicht vorgegeben ist, ist die Übertragung komplexer Tätigkeitsbeschreibung aufbauend auf den Tätigkeiten notwendig, was die Definition eigener Nachrichten notwendig macht (Anforderung 6). Weitere wichtige Eigenschaften sind die Echtzeitfähigkeit und die Qualität der Übertragung (QoS) (Anforderung 9). Um die Entwicklung neuer Module und deren Integration in das bestehende System zu erleichtern wurde weiterhin der Integrationsaufwand in PC-Systeme sowie die Industrieakzeptanz betrachtet. Aufgrund der Anforderung nach einer flexiblen Netzwerkstruktur wurden nur Protokolle untersucht, die keine feste Einrichtung benötigen.

Der Vergleich dieser Protokolle stützt sich auf den Analysen von [46, 47]. OPC-UA und MQTT sind Protokolle für den Datenaustausch in industriellen Anwendungen. OPC ist ein dienst-basier-

tes Protokoll das sowohl Lese- und Schreibzugriffe als auch Publisher/Subscriber-Kommunikation erlaubt. Es ist grundlegend in der Spezifikation IEC 62541 definiert und wird von der OPC Foundation¹ betreut. Es findet insbesondere in industrieller Maschine-Maschine-Kommunikation Anwendung. Die semantische Beschreibung des Adressraums in OPC erlaubt eine einfache Definition von Bezügen, ist jedoch für flexible Netzwerke mit wechselnden Teilnehmern nur bedingt geeignet. MQTT ist ein sehr schlankes Kommunikationsprotokoll für Intermaschinenkommunikation insbesondere im Internet der Dinge. Seine Vorteile liegen im geringen Overhead und dem guten Umgang mit schlechten Netzwerkverbindungen. Es wird insbesondere für den Datenaustausch von Sensorwerten genutzt und eignet sich sehr gut für verteilte Netze, erlaubt jedoch nur eine eingeschränkte Echtzeitfähigkeit. Das Robot Operating System (ROS) ist eine Sammlung von Softwarebibliotheken, die als Open-Source-Projekt gemeinschaftlich gepflegt wird². Ein Masterknoten spannt ein Kommunikationsnetzwerk auf, dem weitere Teilnehmer beliebig beitreten und es auch wieder verlassen können. Aufgrund seines flexiblen Aufbaus ist es in der Wissenschaft beliebt, konnte bisher jedoch keine große Verbreitung in der Industrie finden [48]. ROS2 stellt eine grundlegende Weiterentwicklung von ROS dar, welche auf dem Data Distribution Service (DDS) der Object Management Group³ aufbaut und einen verteilten Datenaustausch mit Fokus auf industrielle Anforderungen wie Echtzeitfähigkeit und Datensicherheit erlaubt⁴. Es erlaubt dezentrale und flexible Netzwerkstrukturen, erfüllt Anforderungen an Echtzeit und unterstützt QoS und eignet sich, ähnlich zu ROS1, sehr gut für die Integration in robotische Systeme. Lediglich die Verbreitung in industriellen Anwendungen ist aufgrund seiner Neuartigkeit noch begrenzt.

Vergleicht man die untersuchten Protokolle erfüllen MQTT und DDS eine Mehrzahl an Anforderungen. Neben den in Tabelle 3 dargestellten Eigenschaften weist DDS mit einem integrierten Rechtemanagement und Verschlüsselung jedoch zusätzlich Vorteile gegenüber MQTT auf [47].

Tabelle 3: Vergleich von Protokollen für die Kommunikation in flexiblen Maschinenanlagen

Protokoll	Flexible Netzwerkstruktur	Flexible Nachrichten	Echtzeit	Quality of Service (QoS)	Integration	Industrienähe
MQTT	●	●	○	●	●	●
OPC UA	○	○	○	○	○	●
ROS1	●	●	○	○	●	○
DDS (ROS2)	●	●	●	●	●	○

¹ <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>

² <https://www.ros.org/>

³ <https://www.omg.org/>

⁴ https://design.ros2.org/articles/ros_on_dds.html

Legende: ●: vollständig erfüllt
 ○: teilweise erfüllt
 ○: schwach erfüllt
 ○: nicht erfüllt

Elektrisches Konzept

Das elektrische Konzept mitsamt der Sicherheitslogik baut auf den Entwicklungen des Projektes *RampUP* [49] auf, dessen Sicherheitskreis mit einer entsprechenden Modul-Schnittstelle (Safety Communication Interface, SCI) [50] als Grundkommunikation in PassForM integriert ist, was die Interoperabilität mit entsprechenden Systemen ermöglicht (Anforderung 8). Das SCI besteht aus acht digitalen Kanälen, von denen zwei für eine 24 V Versorgung genutzt werden. Zwei Kanäle entfallen auf Fehler- und Resetsignal und jeweils zwei weitere für einen sicheren Ein- und Ausgang (Anforderung 11). Für die weitere Versorgung verfügt das geplante System über einen 230 V AC Anschluss an jedem Modul. Für ROS2 wird ein Ethernetanschluss benötigt. Abbildung 7 zeigt eine schematische Darstellung der Versorgungs- und Kommunikationsverbindungen.

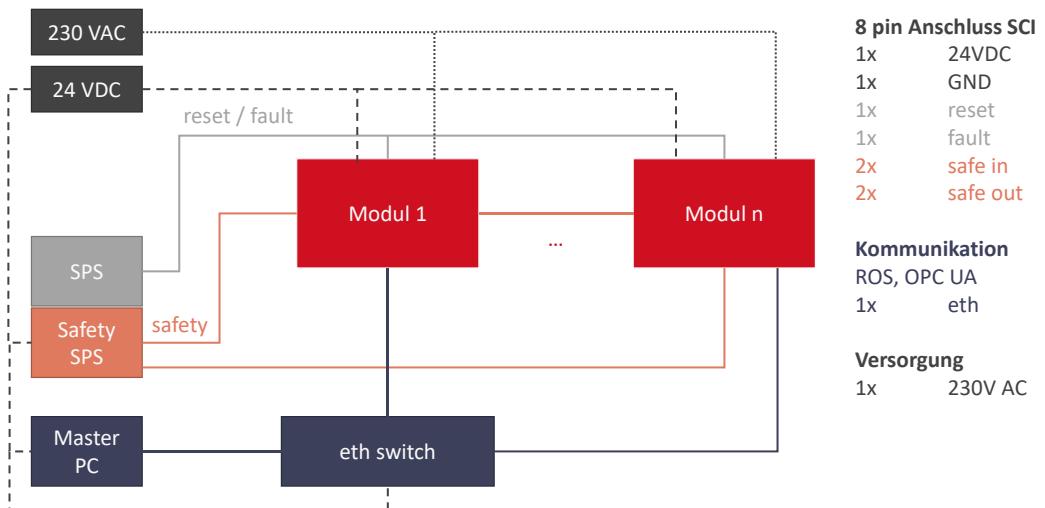


Abbildung 7: Elektrisches Konzept von PassForM

Softwarearchitektur

Die Softwarearchitektur des Systems orientiert sich an dem Grundaufbau von ROS Industrial⁵, einem Open-Source-Projekt zur Übertragung der Fähigkeiten von ROS auf industrielle Anwendungen. Die im Rahmen von ROS Industrial entworfene Struktur für die Verbindung und den Betrieb industrieller Systeme wurde auf das PassForM-Projekt übertragen. Das Modul stellt die elementare Einheit auf Steuerungsebene dar und liefert standardisierte Schnittstellen für die Steuerung der Modulfähigkeiten (Anforderung 8). Mittels ROS2 können neben nativen ROS2-Nachrichten weitere Kommunikationsprotokolle wie z.B. MQTT eingebunden werden. ROS2 stellt die Steuerungsebene des Systems dar. Ein Digitaler Zwilling sammelt sämtliche Informationen der verschiedenen Module und erlaubt für die Echtzeit-Überwachung des Systems. Weiterhin existiert ein Prozessplaner, der aus den Prozessschritten des zu montierenden Produktes die notwendigen Tätigkeiten extrahiert. Eine grafische Bedienoberfläche (GUI) sowie eine allgemeine Prozess-Visualisierung stellen die Systemeigenschaften, die aktuelle Konfiguration und den Prozess dar. Abbildung 8 zeigt den schematischen Aufbau der Softwarearchitektur.

⁵ <https://rosindustrial.org/>

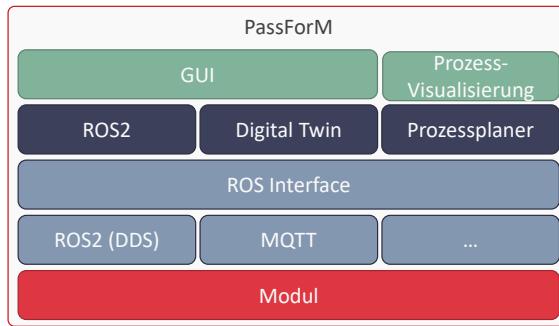


Abbildung 8: Grundarchitektur des Systems (in Anlehnung an [51])

Zielerreichung

Gemäß Antrag waren für den Abschluss von AP 1 die Definition der Anforderungen, die Analyse der Demonstrationsszenarien, ein KMU-Leitfaden zur prozessgetriebenen Modulanalyse und eine Spezifikation der Systemarchitektur geplant. Entsprechend der oben ausgeführten Beschreibungen wurden abgesehen vom KMU-Leitfaden diese Ergebnisse erreicht. Der KMU-Leitfaden wurde abweichend in AP 5 entwickelt.

3.2 AP 2: Entwicklung Hardware

Ziele

Ziel dieses Arbeitspaketes ist die Entwicklung und Aufbau des Gesamtsystems der modularen Montagestation. Aufbauend auf einem Gesamtsystemkonzept werden die Modulaufnahme, die Basis und Ausgestaltung der einzelnen Module sowie der Kopplungsmechanismus und Verbindungsstecker konzeptioniert, entwickelt und implementiert. Das Arbeitspaket schließt mit dem mechatronischen Aufbau des Gesamtsystems.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Entwicklung Hardware-Gesamtkonzept

Auf Grundlage eines ersten groben Entwurfs (Abbildung 9, links) wurde unter Berücksichtigung der im AP 1 ermittelten Anforderungen ein mechanisches Gesamtkonzept entwickelt (Abbildung 9, rechts). Da der Mensch eine zentrale Rolle in der hybriden Montage einnimmt, orientiert sich der Aufbau an dem klassischer und etablierter Montagearbeitsplätze in Tischform, an dem die Montage durch das Personal erfolgen kann. Im Gegensatz zu klassischen Arbeitsplätzen kann die Oberfläche des Tisches flexibel zusammengestellt werden, indem spezifische Module in einen Rahmen aus Aluminiumprofilen eingeschoben werden. So können flexibel Funktionen bereitgestellt werden, die für den individuellen Montageprozess einer Baugruppen erforderlich sind.

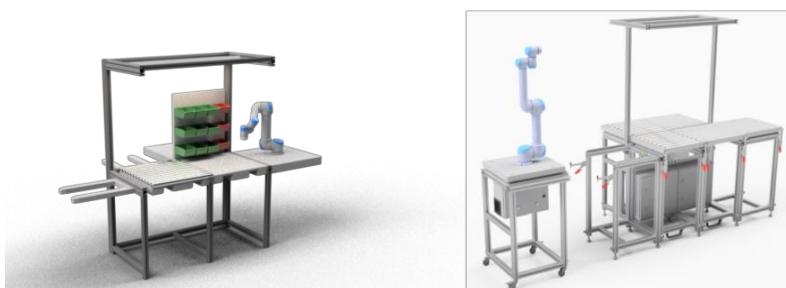


Abbildung 9: Die erste Entwicklungsstufe (rechts) auf Grundlage der Grobidee (links), mit dem sich ein Montagetisch zusammenstellen lässt, indem einzelne Module in einen Rahmen geschoben und so flexibel miteinander kombiniert werden können.

Für einen einfachen Wechsel werden die Module in den Rahmen eingeschoben, bzw. herausgezogen. Der in Abbildung 10 dargestellte Prozess zeigt die manuelle Bereitstellung der Module über einen Handwagen. Dieser wird über Zentrierstifte vor der Modulaufnahme platziert (1) und das Modul anschließend in die Aufnahme eingeschoben (2). Der Wagen kann dann entfernt (3) und die Modulaufnahme verriegelt werden (4), wodurch der Rüstprozess abgeschlossen wird (5). Für die Entnahme eines Moduls sind die Schritte in umgekehrter Reihenfolge durchzuführen. Als Alternative zum Handwagen ist auch der Einsatz einer automatischen Lösung, wie z.B. einem FTS oder eines AMR möglich. In diesem Fall ist für die Verriegelung eine aktive Lösung zu berücksichtigen. Der vollautomatische Fall wurde nicht berücksichtigt und der Fokus auf die Kernfunktionen gelegt, um die Machbarkeit des Konzepts grundlegend nachzuweisen.

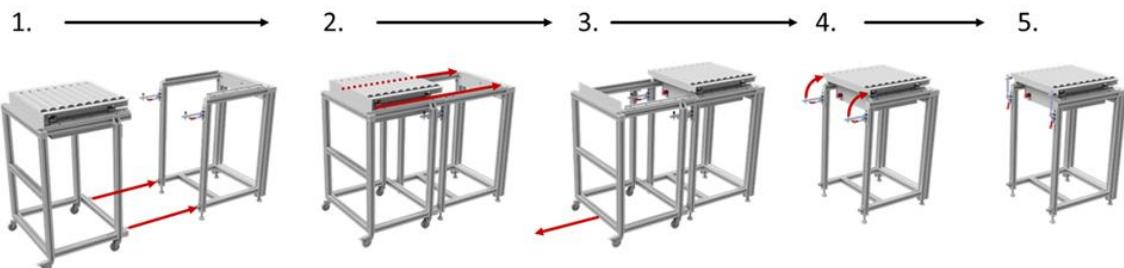


Abbildung 10: Vorgehen zum Wechseln der einzelnen Module in mehreren Schritten.

Das Konzept wurde während der Projektlaufzeit fortlaufend weiterentwickelt und auch nach dem Aufbau auf Grundlage der Tests in AP5 in einigen Details angepasst. Neben der Erweiterung der Modulplätze auf insgesamt acht (Abbildung 11, links) wurden in der finalen Entwicklungsstufe (Abbildung 11, rechts) die Ausrichtung der Modulaufnahmen an den Seiten des Tisches um 90° gedreht, sodass alle Module von der Vorder- oder Rückseite unter Verwendung des dafür vorgesehenen Transportwagens eingeschoben werden können. Hierdurch wird unter anderem auch eine lineare Verkettung mehrerer Systeme möglich, um Montagelinien zu bilden.

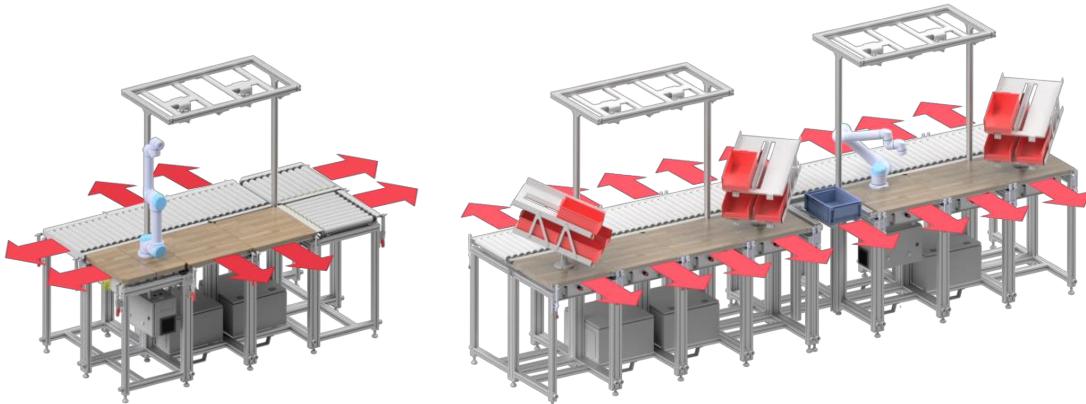


Abbildung 11: Zweite (links) und finale Entwicklungsstufe des Montagetisches (rechts). Die Drehung der außenliegenden Aufnahmebuchten erlaubt die Verkettung einzelner Systeme zu Montagelinien.

Im Rahmen des Gesamtkonzeptes wurde ein konsistentes Konzept zur Ausrüstung einer Montagegestation mit intelligenten Modulen entwickelt. Im Folgenden wird auf die einzelnen Teile des Montagesystems im Detail eingegangen. Zunächst wird die zentrale Modulaufnahme beschrie-

ben, gefolgt der Detaillierung der Elektromechanischen Schnittstelle zwischen Modul und Aufnahme. Im Anschluss werden das Modulkonzept sowie die spezifische Implementierung einzelner Funktionen vorgestellt.

Entwicklung Modulaufnahme (Basis)

Als struktureller und informationstechnischer Kern des Montagesystems besitzt die in Abbildung 12 dargestellte zentrale Modulaufnahme verschiedene Funktionen. Durch den Rahmen aus Aluminiumprofilen wird eine stabile Basis für die zusammengestellten Module bereitgestellt, die gemäß den Anforderungen die statischen und dynamischen Lasten während des Betriebs aufnimmt.

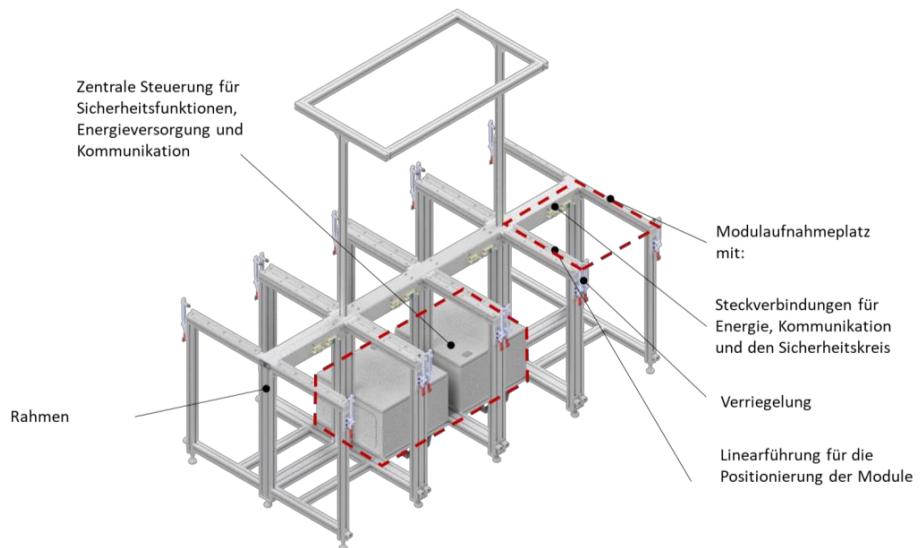


Abbildung 12: Aufbau der zentralen Modulaufnahme des modularen Montagesystems

Außerdem ist im Rahmen zentrale Steuerung und Energieversorgung untergebracht, die die einzelnen Module mit 24 V DC und alternativ 230 V AC versorgt (Abbildung 12). Weitere Spannungsniveaus werden in den Modulen selbst gewandelt. Zusätzliche Energieformen wie Druckluft können ebenfalls zentral über die Modulaufnahme verteilt und den Modulen über entsprechende Schnittstellen bereitgestellt werden. Neben der Energieversorgung wird auch die Kommunikation der Module zentral koordiniert und diesbezüglich ein Ethernet-Netzwerk bereitgestellt sowie ein Server betrieben, gegenüber dem sich die einzelnen Module per Handshake identifizieren und Aufgaben zugewiesen bekommen. Den an das System gestellten Sicherheitsanforderungen wird durch eine zentrale Sicherheits-SPS entsprochen, mit dem ein Sicherheitskreis über das Gesamtsystem mit den eingebundenen Modulen aufgebaut und überwacht wird. Sämtlich Kommunikations-, Sicherheits- und Energieverbindungen werden über spezielle Stecker in den Modulplätzen bereitgestellt, die im Folgenden beschrieben werden.

Gestaltung der Modulplätze

Abbildung 13 zeigt die Gestaltung eines einzelnen Modulplatzes innerhalb der Modulaufnahme im Detail. Eine definierte Positionierung der einzelnen Module zueinander wird über Linearführungen erreicht, auf denen die Module in Ihren Platz in der Modulaufnahme geschoben werden. Beim Einschieben der Module wird gleichzeitig eine elektrische Verbindung zu den zentralen Steuerungskomponenten hergestellt und anschließend die Energieversorgung freigeschaltet.

Eine Verriegelung der Module über Spannhebel verhindert eine unbeabsichtigte Trennung der Verbindung und stellt eine feste Verbindung zwischen Modulen und Rahmen sicher.

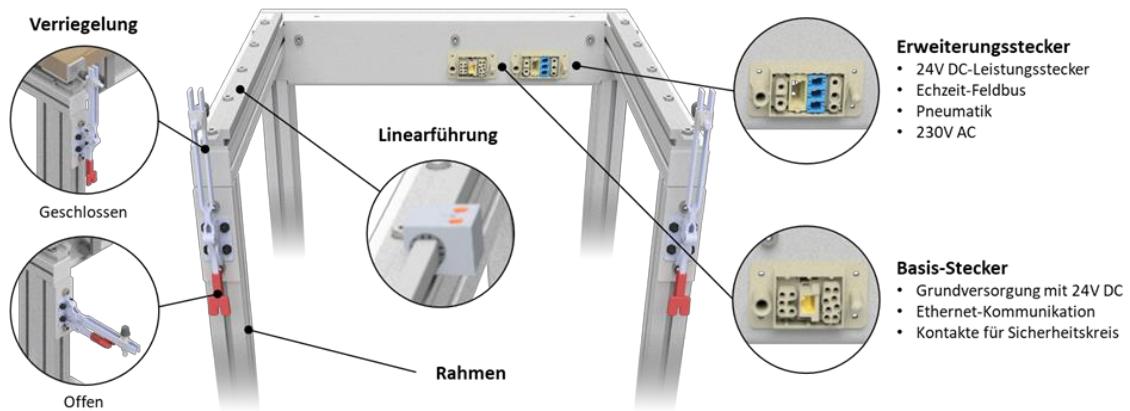


Abbildung 13: Platz für die Aufnahme eines Moduls im Detail

Für die elektrische Verbindung sind zwei Stecker-Typen vorgesehen. Über den Basis-Stecker, den jedes Modul als Minimalanforderungen implementieren muss, werden die Grundfunktionen abgedeckt. Dazu wird zum einen eine Grundversorgung mit 24 V Gleichstrom (DC) bereitgestellt, die Kommunikationsschnittstelle über Ethernet sowie die elektrische Schnittstelle für sicherheits-relevante Funktionen, die in den Modulen implementiert werden müssen. Darüberhinausgehende Anforderungen, wie ein erhöhter Strombedarf (24 V DC), 230 V Wechselspannung (AC), Druckluft, oder eine echtzeitfähige Feldbus-Schnittstelle werden seitens der Modulaufnahme in einem Erweiterungsstecker bereitgestellt. Dieser kann im Bedarfsfall in den Modulen implementiert werden.

Entwicklung Module

Für die Implementierung einzelner Module wurde ein Grundmodul konzipiert, dass die notwendigen elektrischen und mechanischen Schnittstellen zu der Modulaufnahme sowie Grundfunktionen entsprechend der ermittelten Anforderungen bereitstellt.

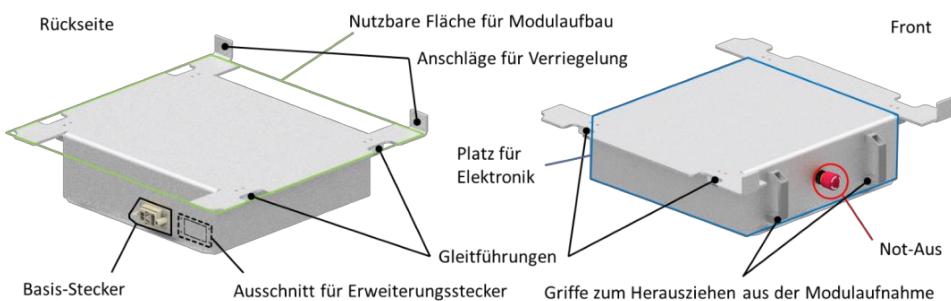


Abbildung 14: Grundaufbau eines Moduls mit seinen mechanischen und elektrischen Schnittstellen

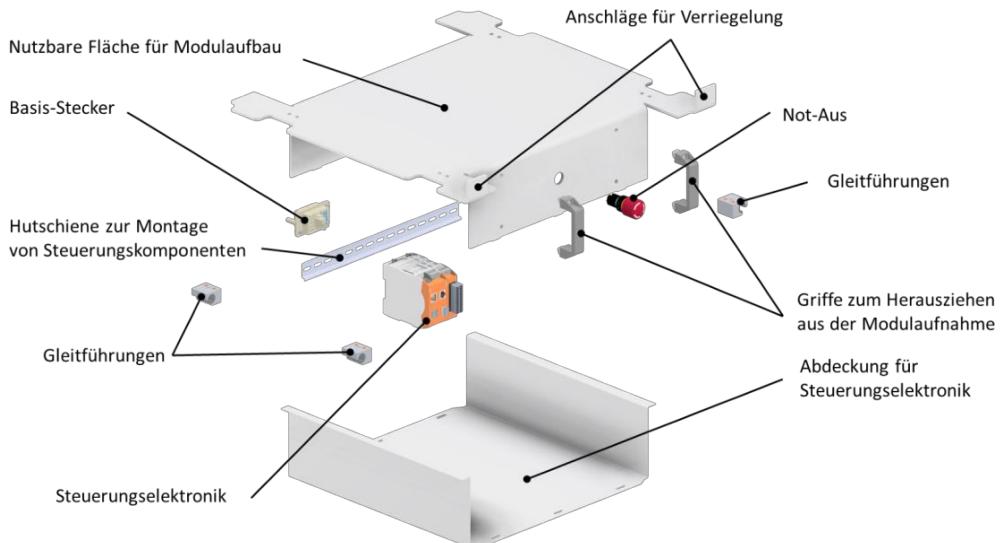


Abbildung 15: Explosionszeichnung des konzipierten Grundmoduls

Grundmodul

Der Aufbau dieses Grundmoduls ist in Abbildung 14 und Abbildung 15 dargestellt und besteht aus zwei gekanteten Blechteilen. Sämtliche Komponenten, die für die Grundfunktionen notwendig sind, werden an das „Grundblech“ montiert. Auf der Oberseite des Moduls befindet sich Platz für den Aufbau individueller Funktionen.

Auf der Rückseite sind zwei Aussparungen für die Steckverbindung zur Modulaufnahme vorgesehen. Eine wird durch einen „Basis-Stecker“ belegt, über den die elektrischen und kommunikativen Grundfunktionen ermöglicht werden. Hierzu gehören:

- Ethernet-Verbindung
- Sicherheitskreis
- Grundversorgung mit 24 V Gleichstrom

Erfordert ein Modul weitere Schnittstellen können diese über den Einbau eines Erweiterungssteckers abgedeckt werden.

Mechanische Schnittstellen

An den Seiten des Grundbleches sind Gleitführungen montiert. Diese erlauben ein spielfreies Einschieben der Module in die Modulaufnahme und setzen damit die Anforderung an eine definierte Positionierung der Module zueinander um. Die Gleitführungen sind so ausgelegt, dass statische und dynamische Kräfte während des Betriebs aufgenommen werden können. Für die Arretierung der Module sind am vorderen Ende zwei Anschlagflächen für die Verriegelung der Module in der Modulaufnahme integriert. Zum einfacheren Herausziehen der Module beim Rüsten des Montagesystems sind an der Vorderseite zusätzliche Griffe angebracht.

Für die Implementierung der Sicherheitsfunktionen ist ein Not-Aus-Knopf integriert, der auf der Vorderseite dem Bediener zugänglich ist.

Steuerung

Die Elektronik der Modulsteuerung wird auf am Grundblech montiert und durch das zweite Blech abgedeckt. Als Grundvoraussetzung sieht das Konzept für die Kommunikation eine Einbindung

der einzelnen Module in ein ROS-Netzwerk über Ethernet vor. Die zu verwendende Steuerung muss als Grundfunktionalität also mindestens einen Ethernet-Anschluss aufweisen und über entsprechende ROS-Bibliotheken in das Netzwerk eingebunden werden können. Um die Kosten für die Modulsteuerung bei Modulen ohne große Funktionalitäten, wie z.B. der Bereitstellung einer einfachen Arbeitsfläche ohne Sensoren, gering zu halten, bieten sich verschiedene „Low-Budget“-Komponenten an. Für die Grundfunktionalitäten, wie den initialen Handshake zwischen Modul und Zentralsteuerung sind Komponenten auf Basis von ARM-kompatiblen Mikrocontrollern oder Single Board Computern (SBC), wie einem Raspberry Pi ausreichend. Eine Zusammenstellung entsprechender Komponenten ist nachfolgend aufgeführt.

Abhängig von den Funktionen der Module, kann eine höhere Rechenleistung erforderlich sein oder weiteren Anforderungen an benötigte Ein- oder Ausgänge gestellt werden, die über andere Steuerungskomponenten oder Erweiterungskarten abgedeckt werden können.

Implementierung spezifische Funktionen

Für die Konfiguration des Montagesystems zur Abbildung verschiedener Demonstrationsszenarien werden unterschiedliche Funktionalitäten in einzelnen Modulen abgebildet. Insgesamt wurden die in Abbildung 16 gezeigten Module umgesetzt, die nachfolgend genauer beschrieben werden.

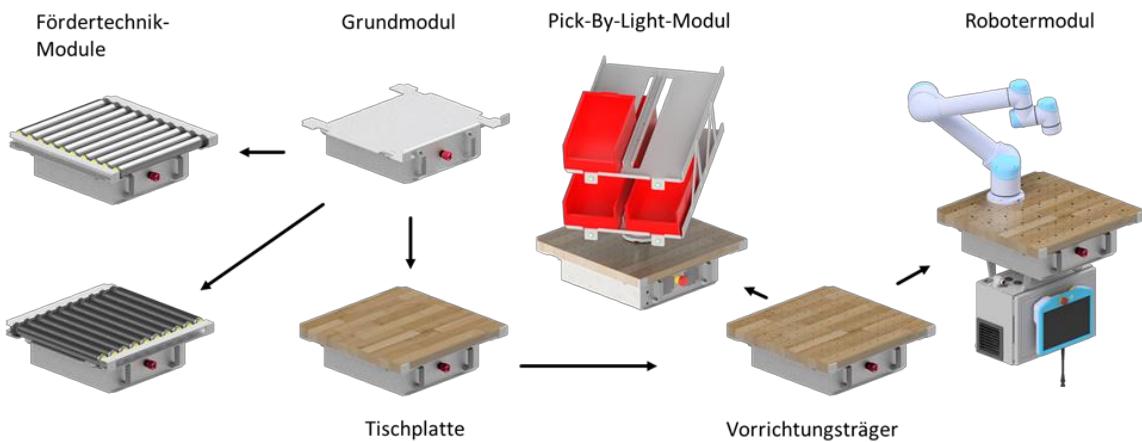


Abbildung 16: Modulvarianten, ausgehend von einem definierten Grundmodul

Ausgehend vom Grundmodul werden zunächst allgemeine Anforderungen und der grundlegende Aufbau beschrieben, den sich alle Module teilen. Anschließend werden „relativ dumme“ Ausführungen ohne nennenswerte Funktionalitäten vorgestellt. Darauf aufbauenden werden komplexere Varianten behandelt und ihre Funktionalitäten und besondere innere elektrische Schnittstellen definiert sowie die daraus resultierenden Anforderungen an die Steuerung der einzelnen Module erfasst und mögliche Steuerungskomponenten vorgeschlagen.

Tischplatte / Vorrichtungsträger

Das Modul Tischplatte besitzt neben der Arbeitsfläche keine Funktionen, die eine Verbindung mit anderen Komponenten erforderlich macht. Als Variante kann die Tischplatte mit Bohrungen zur Ausrichtung von Vorrichtungen versehen werden, über die eine definierte Positionierung der darauf befindlichen Komponenten erfolgen kann.

Das Modul Tischplatte besitzt keine Sensorik oder Aktuatoren. Elektrische Schnittstellen, die über die Grundfunktionalität zur Verbindung von Basis und Modul hinausgehen, existieren somit nicht.

Mangels Funktionen sind über die Grundanforderungen (ROS2-Fähigkeit über Ethernet) hinaus keine weiteren Besonderheiten zu berücksichtigen. Durch die niedrigen Anforderungen kann eine sehr kostengünstige Steuerung verwendet werden. Erweiterungen sind nicht notwendig.

Pick-by-Light-Modul

Das Pick-by-Light-Modul dient der Materialbereitstellung während des Montageprozesses über Kleinladungsträger. Zur Unterstützung wird dem Werker über ein Lichtsignal angezeigt in welchem Behälter sich die benötigten Teile befinden. Über das Drücken eines Tasters kann eine Materialbedarfsmeldung abgesetzt werden, wenn das enthaltene Material aufgebracht ist.

Für die Anbindung der Taster und Lampen sind entsprechende digitale Ein- und Ausgänge auf der Steuerungsseite erforderlich. Für SBC mit Kompatibilität zum 40-Pin-Connector des Raspberry Pi kommen folgende Lösungen in Frage:

Robotermodul

Über das Robotermodul lassen sich Teile des Montageprozesses automatisieren. Abhängig vom verwendeten Endeffektor können so z.B. Handhabungsoperationen durchgeführt werden wie etwa das Anreichen oder Einlegen von Material in entsprechende Vorrichtungen. Für die Exemplarische Implementierung wird dazu auf einen bereits vorhandenen UR5e von Universal Robotics zurückgegriffen, der mit einem Zwei-Finger-Greifer von Robotiq ausgestattet ist.

Um den zur Verfügung stehenden Platz möglichst effektiv zu nutzen und ggf. benötigte Vorrichtungen direkt auf dem Robotermodul umzusetzen, lässt sich der Roboter-Arm flexibel auf einer Tischplatte mit eingelassenen Montagebohrungen verschrauben. Der Schaltschrank des Roboters kann auf der Unterseite des Moduls befestigt werden. Die Abdeckung der Modulsteuerung ist um vier Montagebohrungen im Abstand von 296 x 150 mm zu ergänzen. Der Roboter benötigt für den Betrieb eine Spannung von 230 V AC. Das Modul muss dementsprechend mit einem Erweiterungsstecker ausgerüstet werden.

Die Ansteuerung des Roboters erfolgt über Ethernet, der Greifer kann über USB angesprochen werden. In dem Modul muss damit Entweder eine Steuerung mit USB-Schnittstellen und zwei Ethernet-Ports vorhanden sein. Ein SBC, der diese Anforderung erfüllt ist nachfolgend aufgeführt. Alternativ kann ein Raspberry Pi eingesetzt werden und ein zusätzlicher Ethernet-Switch in dem Modul untergebracht werden.

Fördertechnikmodul(e)

Über die Fördertechnikmodule lassen sich Werkstücke oder Materialien auf dem Montagesystem transportieren und durch die Anbindung weiterer externer Fördertechnik die Materialbereitstellung automatisieren oder der Montageprozess mit vor- und nachgelagerten Stationen verketten. Auf dem Grundmodul aufgesetzt sind Förderrollen angebracht, die je nach Ausführung um 90 Grad gedreht sein können. Durch die zwei Ausführungen der entwickelten Fördertechnikmodule kann ein flexibles Fördertechnik-Layout erstellt werden.

Die Ansteuerung der Rollenförderer geschieht über eine angetriebene Motorrolle, deren Drehrichtung und -geschwindigkeit über einen Motorcontroller gesteuert wird. Die Kommunikation mit dem Motorcontroller kann je nach Ausführung über unterschiedliche Schnittstellen und Protokolle durchgeführt werden. Die einfachste Form der Ansteuerung kann über Digital I/Os umgesetzt werden. Für die Ansteuerung des Motorcontrollers muss die Steuerung des Moduls neben den Grundanforderungen (ROS2-Fähigkeit über Ethernet) über 4x 24 V tolerante Ausgänge und einen Eingang verfügen.

Aufbau der Module

Auf Grundlage der konzeptionellen und entwicklungsspezifischen Vorarbeiten wurden die in Abbildung 16 dargestellten Module auskonstruiert und aufgebaut. Abbildung 17 zeigt exemplarische ein Fördermodul und dessen interne Verkabelung.



Abbildung 17: Umsetzung eines Fördermoduls und seiner Steuerung

Aufbau der Modulaufnahme

Parallel zu den Modulen wurde die Modulaufnahme aufgebaut. Abbildung 18 zeigt den Zusammenbau des Rahmens, der im späteren Verlauf noch einmal zu dem in Abbildung 11 dargestellten finalen Konzept umgebaut wurde. In den Rahmen wurde anschließend die zentrale Steuerung und Stromversorgung eingebaut (Abbildung 19) und die einzelnen Modulplätze mit Linearführungen, Spannern zur Verriegelung und Steckern ausgestattet (Abbildung 20). Hierbei wurde das Konzept zur Ausrichtung des Transportwagens vor den Modulplätzen angepasst. Dieses sah ursprünglich Zentrierbuchsen oberhalb der Füße des Montagesystems vor. Durch eine zu geringe Steifigkeit des Wagens konnte allerdings keine wiederholgenaue Ausrichtung der Linearführungen zueinander erreicht werden. Durch die Integration der Zentrierbuchsen in die tragende Struktur unterhalb der Linearführungen konnte dieses Problem behoben werden (Abbildung 21).

Der fertig aufgebaute Demonstrator ist in Abbildung 22 dargestellt.

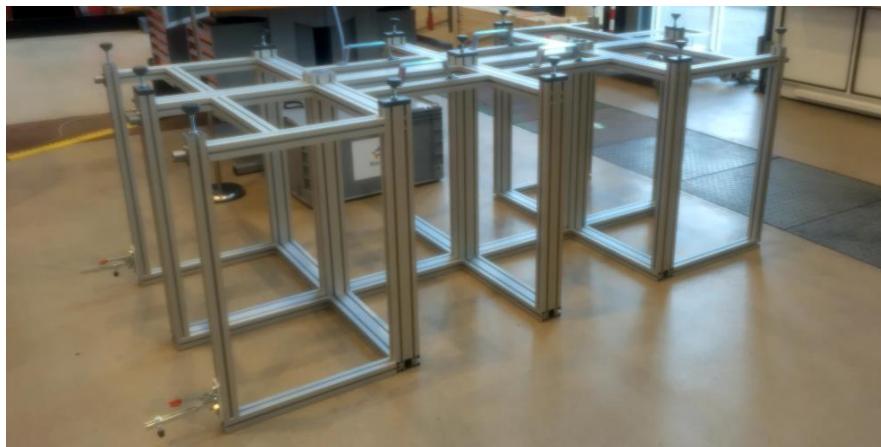


Abbildung 18: Zusammenbau des Rahmens. Hier noch in der Konfiguration mit seitlichem Moduleinschub.



Abbildung 19: Einbau der zentralen Stromversorgung und Ausstattung der Modulplätze



Abbildung 20: Detaillierte Ausstattung eines Modulplatzes



Abbildung 21: Modifikation der Modulaufnahmen. Altes (links) und neues (rechts) Konzept zum Ausrichten des Transportwagens vor der Modulaufnahme für die Durchführung des Modulwechsels



Abbildung 22: Vollständig aufgebauter Demonstrator in der Forschungseinrichtung

Zielerreichung

Gemäß Antrag waren für den Abschluss von AP 2 die Entwicklung und Aufbau des modularen Montageplatzes sowie der zugehörigen Module inklusive der Integration von notwendiger Sensorknik geplant. Entsprechend der oben ausgeführten Beschreibungen wurden diese Ergebnisse erreicht.

3.3 AP 3: Entwicklung Software

Ziele

Ziel dieses APs ist die Entwicklung und Implementierung der Software für die modulare Montagegestation. Dies umfasst die digitale Schnittstelle, das Framework für den erweiterbaren digitalen Zwilling, die semantische Repräsentation von Montageprozessen, einen Algorithmus für die Anforderung von fehlenden Ressourcen sowie ein Benutzerinterface.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Entwicklung der digitalen Schnittstelle

Auf Basis der Systemspezifikationen aus AP 1 wurden nötige Signale und entsprechende Schnittstellen zur Kommunikation zwischen den Modulen und dem Tisch definiert und implementiert. Entsprechend der Analyse verschiedener Kommunikationsprotokolle wurde DDS, eine ROS2-Komponente, als Grundlage genutzt. DDS bietet insbesondere Vorteile bei der Abbildung flexibler Netzwerkstrukturen mit häufigen Rekonfigurationen sowie bei der Integration unterschiedlicher Nachrichten mit hohen Echtzeitanforderungen.

Systemarchitektur

Die Softwarearchitektur orientiert sich, wie in AP 1 ausgeführt, am RAMI 4.0 Referenzmodell und dem Konzept von ROS Industrial. Das PassForM-Projekt greift diese Struktur auf und gliedert die funktionalen Elemente und deren Kommunikation gemäß diesen Ansätzen. Es existiert eine Visualisierungsschicht (Frontend) und eine Steuerung mittels ROS2 welche direkt auf die Treiber und Hardware der Module zugreift, und Schnittstellen zu den Systemkomponenten bereitstellt. Die Steuerung ist hierarchisch aufgebaut, wobei Produkten ein Prozess zugeordnet ist, dessen Tätigkeiten vom PassForM-System an die individuellen Module verteilt wird. Hierfür verfügen die Komponenten Produkt, Tisch und Module über eine Verwaltungsschale (VWS), welche die Hardware mitsamt grundlegender Repräsentation in das PassForM-System integrieren und die Grundlage für den Digitalen Zwilling darstellt. Die Speicherung der Daten erfolgt dezentral in den individuellen VWS. Das Wissen über diese VWS wird durch eine vom Tisch bereitgestellte Registry verwaltet. Grundlage für die Umsetzung stellt die Software BaSyx⁶ mit den Komponenten Server und Registry. Abbildung 23 zeigt die grundlegende Struktur der Software.

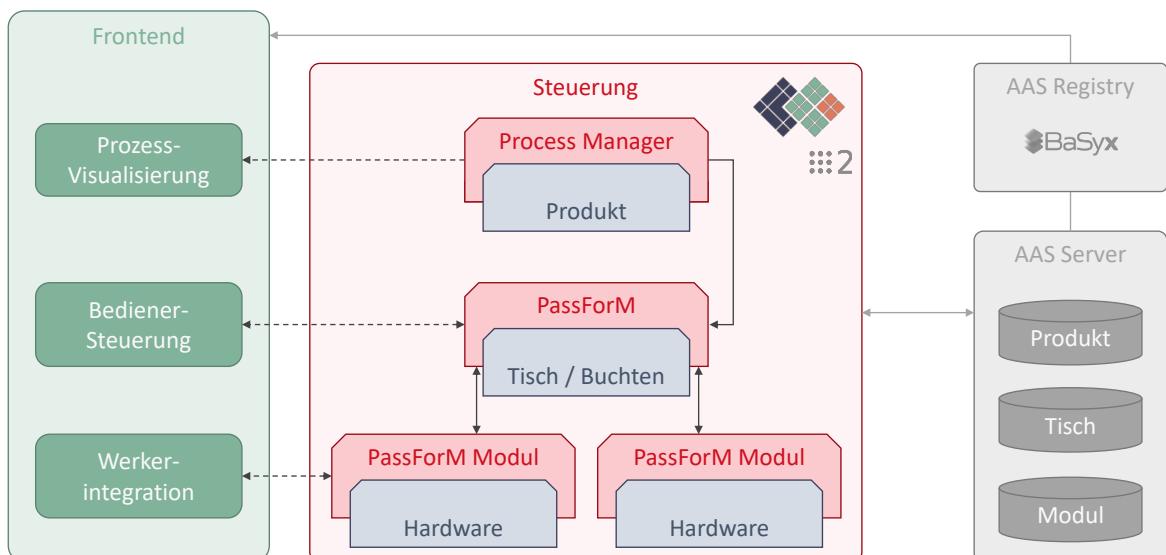


Abbildung 23: Grundstruktur der Software. Die Steuerung nutzt Verwaltungsschalen sowohl für die Hardware der Module, als auch für den PassForM-Tisch mit den Buchten für die individuellen Module und den *Process Manager*, der das zu fertigende Produkt verwaltet. Die Registry verwaltet diese Verwaltungsschalen und liefert Informationen für die Visualisierung im Frontend. Echtzeitdaten erhält das Frontend direkt von den Verwaltungsschalen.

⁶ <https://wiki.eclipse.org/BaSyx>

Kommunikation

Das Sicherheits- und Kommunikationsinterface (SCI) dient der grundlegenden Verbindung des Modulkerns mit dem PassForM-System und stellt Sicherheitskanäle und die elektrische Versorgung der Kommunikationseinheiten (SPS, Computer, ...) mit 24 V sicher. Die Spezifikation dieser Schnittstelle basiert auf den in AP1 ermittelten Anforderungen nach einer sicheren Überwachung der Module, kombiniert mit der Versorgung mit Steuerspannung. Die Konfiguration der SCI ist angelehnt an OSSD und verfügt über jeweils zwei Ein- und Ausgangssignale [52]. Module können somit sowohl sichere Signale empfangen und sicher extern gestoppt werden als auch sichere Signale senden und externe Module und den Tisch sicher stoppen. Mit einem zeitversetzten Signal können beide Kanäle kurzschluss- und querschluss-sicher ausgewertet werden. In der aktuellen Konfiguration sind sämtliche Modulplätze in Reihe geschaltet, was die Anforderungen an die Sicherheitsauswertung im Tisch reduziert. Gleichzeitig erlaubt dies eine kostenneutrale Erweiterung des Tisches um zusätzliche Modulplätze, ohne weitere sichere Signalein- und -ausgänge bereitzustellen zu müssen. Der Sicherheitskreis kann in jedem Modul geöffnet werden, was sowohl im Tisch als auch den anderen Modulen zu einem Ausfall des Sicherheitssignals führt. Für die Identifikation fehlerhafter Zustände verfügt jeder Modulplatz über ein nicht-sicheres Fehlersignal (*fault*). Ein digitaler Eingang an den Modulen erlaubt die Quittierung von Fehlern (*reset*). Entsprechend der OSSD-Spezifikation arbeiten diese sechs Signale auf 24 V. Gemeinsam mit der 24 V Versorgung ist das SCI acht-adrig ausgeführt. Tabelle 4 zeigt die Belegung der einzelnen Adern.

Tabelle 4: Belegung und Beschreibung des Sicherheits- und Kommunikationsinterfaces (SC)

Pin	Belegung	Kommentar
1	24 V +	Versorgung +24 V DC
2	Safety In	Sicherheitssignal Tisch, Kanal 1
3	0 V (24 V -)	Versorgung 0 V DC
4	Safety Out	Sicherheitssignal Modul, Kanal 1
5	Safety In	Sicherheitssignal Tisch, Kanal 2
6	Safety Out	Sicherheitssignal Modul, Kanal 2
7	Fault	Modulausgang Fehlersignal
8	Reset	Moduleingang Quittierung

Weitere Kommunikation zwischen den Modulen und dem PassForM-System geschieht auf der Ebene der Modul-Eigenschaften und –Fähigkeiten, welche ebenfalls gemäß den Anforderungen aus AP 1 und den identifizierten Tätigkeiten definiert und entwickelt wurden. Hierfür legen Module ihre beschreibenden Eigenschaften und Fähigkeiten in ihrer lokalen VWS ab und weisen über die zentrale Registry auf diese Daten. Die statischen Modul-Eigenschaften setzen sich aus unter anderem aus Herstellerdaten und Informationen über die notwendige Versorgung zusammen. Informationen wie eine einzigartige ID (Universally Unique Identifier, *uuid*), ein beschreibender Text, Herstellername und Seriennummer sowie die MAC-Adresse als Hardware-Identifier werden als Text-Zeichenfolgen hinterlegt. Die Gestaltung dieser Daten folgt hierbei der vom BMWK herausgegebenen Konvention für die Kommunikation mittels VWS [53]. Hierbei werden Daten hierarchisch aufgebaut und einheitliche Datentypen und Beschreibungen genutzt. Grundlegende Da-

tenstrukturen wie technischen Eigenschaften und eine digitale Namensplakette folgen den Vorgaben der Plattform Industrie 4.0 [54, 55]. Andere sind zusätzlich modelliert und folgen den Grundlagen der VWS, indem etwa gleiche Datentypen genutzt werden. Ein Beispiel sind die Informationen über die notwendige Versorgung, welche in einer *SubmodelElementCollection* zusammengefasst sind und Informationen über notwendige oder vorhandene Versorgungen bündelt oder das Inventar eines Moduls mit den aktuell verfügbaren Gegenständen. Dieser hierarchische Aufbau erlaubt die gezielte Wiedernutzung einzelner Inhalte in anderen Nachrichten und ermöglicht eine einfache Anpassung bei späterer Änderung von mehrfach genutzten Nachrichten. Die VWS der Bucht etwa, welche Eigenschaften der Modul-Gegenseite (Bucht) sammelt, nutzt die gleiche *SubmodelElementCollection* zur Darstellung der aktuell aktiven Versorgungen (Code 1).

```
{
  "idShort": "SupplyStatus",
  "description": [
    {
      "language": "en-us",
      "text": "List of all utilities currently active."
    },
    {
      "language": "de",
      "text": "Liste aller aktuell aktiven Versorgungen."
    }
  ],
  "modelType": {
    "name": "SubmodelElementCollection"
  },
  "value": [
    {
      "idShort": "dc_24v",
      "description": [
        {
          "language": "en-us",
          "text": "24V DC."
        },
        {
          "language": "de",
          "text": "24V DC."
        }
      ],
      "modelType": {
        "name": "Property"
      },
      "value": "true",
      "valueType": "boolean"
    },
    {
      "idShort": "ac_230v",
      "description": [
        {
          "language": "en-us",
          "text": "230V AC."
        },
        {
          "language": "de",
          "text": "230V AC."
        }
      ],
      "modelType": {
        "name": "Property"
      },
      "value": "false",
      "valueType": "boolean"
    }
  ],
  "ordered": false
},
```

Code 1: Beispiel für eine vereinheitlichtes Datenelement mittels *SubmodelElementCollection* zur Darstellung der aktiven Versorgung in einer Bucht

Für einzelne Fähigkeiten der Module werden ebenfalls eigenständige Datenmodelle (*Submodels*) angelegt, um so eine flexible Darstellung und saubere Trennung der Inhalte zu erreichen. Die

Gestaltung dieser Submodels orientiert sich ebenfalls an der Dokumentation der Verwaltungsschalen und ist in Tabelle 5 dargestellt. Das Submodel einer Fähigkeit besteht aus zwei SubmodelElementCollections (SMC), deren Aufbau in Tabelle 6 und Tabelle 7 dargestellt sind.

Tabelle 5: Submodel zur Beschreibung einer Fähigkeit

idShort	{arbitrary}		
Class	Submodel		
Category	Skill		
Parent	Asset Administration Shell of the module providing the skill.		
Explanation	Submodel containing description and parameters of a specific skill.		
[SME type]	semanticId = [idType]value	[valueType]	card.
idShort	Description@en	example	
[Property] skilltype	Type of skill according to PassForM master documentation.	[int] 3	1
[SMC] SkillProperties	List of all skill properties.	n/a	0..1
[Property] driver	ROS2 topic for the driver of this skill.	[string] topic_move	1
[SMC] Operations	List of all skill operation modes.	[SMC Operation]	0..n

Tabelle 6: SubmodelElementCollection zur Beschreibung der SkillProperties einer Fähigkeit.

idShort	SkillProperties		
Class	SubmodelElementCollection		
Parent	Asset Administration Shell of the skill the parameters belong to.		
Explanation	Submodel containing description and parameters of a specific skill.		
[SME type]	semanticId = [idType]value	[valueType]	card.
idShort	Description@en	example	
[Range] weight	Possible weight of the object the skill might modify in kg.	[double] min: 0 max: 5	1
[Range] distance	Distance from the modules origin the object can be modified at in m.	[double] min: 0 max: 0.25	0..1
[Range] velocity	Potential velocity of the objects modification in m/2.	[double] min: 0 max: 0.1	0..1
[Range] acceleration	Potential acceleration of the objects modification in m/s^2.	[double] min: 0 max: 5	0..1
[Range] {arbitrary}	Potential further parameters	[double] min: 0 max: 5	0..n

Tabelle 7: SubmodelElementCollection zur Beschreibung einer Operation einer Fähigkeit.

idShort	{idShort_skill}_{arbitrary}		
Class	SubmodelElementCollection		
Category	Operation		
Parent	Asset Administration Shell of the skill the operations belong to.		
Explanation	Submodel describing a potential operation mode of a specific skill.		
[SME type]	semanticId = [idType]value	[valueType]	card.
idShort	Description@en	example	
[inputVariable] {arbitrary}	Name of input variables must match an available parameter. Note: input variables can be required or optional, which is depicted by ist category.	[int] 3	0..n
[outputVariable] PoseStamped	Position of the modified object after the skill was performed.	[SMC]	1

Die Wahl der Skills basiert auf der in AP 1 entwickelten Prozessabstraktion. Aufbauend auf der recherchierten Literatur und den analysierten Montageprozessen wurde eine Fähigkeitsabstraktion mit drei verschiedenen Tätigkeitskategorien (Montage, Modifikation, Primitiv) mit insgesamt 15 unterschiedlichen Tätigkeiten (SkillTypes) entwickelt. Wie oben angesprochen sind Skills hierarchisch organisiert, wodurch komplexere Tätigkeiten aus Teiltätigkeiten zusammengesetzt oder direkt als komplexe Funktion hinterlegt sein können (Abbildung 24). Beide Möglichkeiten sind im Modul integriert, welches bei dem Aufruf eines Skills entweder die einzelnen Teiltätigkeiten oder die hinterlegte Gesamtaktivität ausführt.

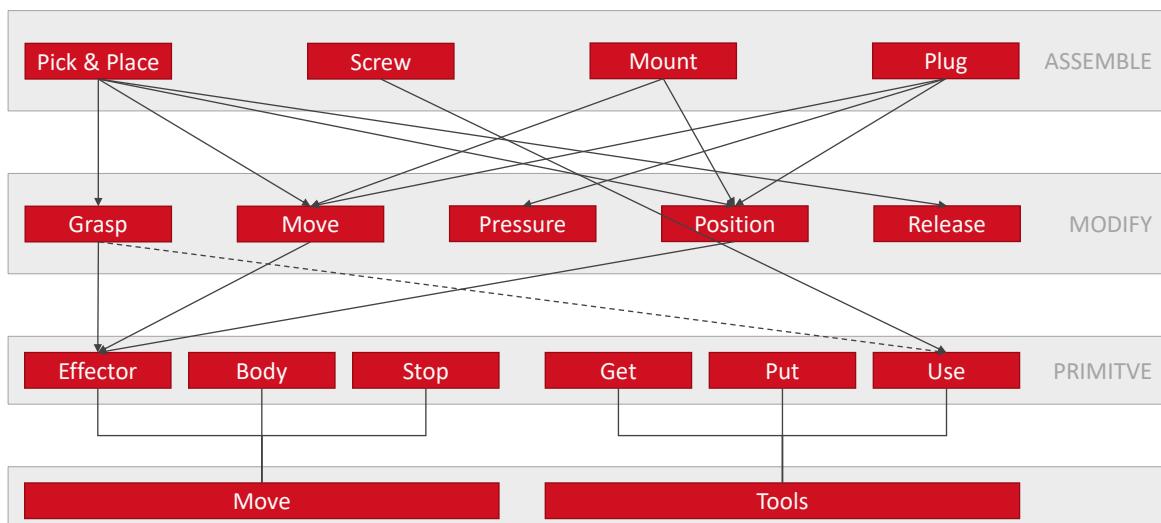


Abbildung 24: Hierarchischer Zusammenhang der im Projekt genutzten Fähigkeiten.

Zur genaueren Definition sind den Skills Parameter zugeordnet (Tabelle 8). Diese beschreiben konstante Eigenschaften einer Tätigkeit, welche zwingend für den Prozess erforderlich und nicht veränderbar sind (Drehmoment einer Schraubverbindung).

Tabelle 8: Eigenschaften der Fähigkeiten

Skill	Type	Special	Geometry				Limits				Target
			Trajectory	Coord	Direction	a_max	v_max	F_max	M_max	ID	
move	effector		x	x	x	x	x	x			
	body		x	x	x	x	x	x			
	stop										
tool	get		x							item, task, (tool)	
	put		x							tool	
	use		x							item, task, (tool)	
modify	grasp					x				item	
	move						x			item	
	apply_pressure				x			x		item	
	position							x		item	
	release								x	item	
assembly	pick_and_place									item	
	screw				x					item, screw	
	mount									item1, item2	
	plug									item1, item2	

Sicherheit der Modulsteuerung

Jedes Modul und der Tisch senden in regelmäßigen Abständen eine *Heartbeat*-Nachricht, welche den Rest des Systems über den korrekten Betrieb der entsprechenden Komponente informiert. Ebenfalls verfügen sowohl der Tisch als auch die Module über einen *Watchdog*, welcher kontinuierlich den Eingang der *Heartbeats* überwacht. Hierbei muss sich die Gegenseite (Module bei Tisch und Tisch bei Modulen) vor Ablauf einer vorgegebenen Zeit melden. Geschieht dies nicht, springt die entsprechende Komponente, wie bei Ausbleiben des Sicherheitssignals, in einen Fehlerzustand. Der Tisch deaktiviert die entsprechende Bucht und Module stoppen die Ausführung

ihrer Bewegungen. Abbildung 25 zeigt den Ablauf der Überwachung mittels *Watchdog*. Bei Start des Systems erstellt der Tisch für jede vorhandene Bucht einen individuellen *Watchdog*, der ausschließlich *Heartbeats* des dort angeschlossenen Moduls überwacht. Ist kein Modul angeschlossen ist der *Watchdog* inaktiv. Bei Verbindung eines Moduls mit dem Tisch führt es eine Kopplungsanfrage durch, auf die der Tisch einerseits mit der internen Zuweisung von Tisch und Bucht reagiert und andererseits dynamische Parameter wie die Position an das Modul überträgt. Hieraufhin starten beide ihre *Watchdogs* und wechseln in den normalen Betrieb. Sobald ein *Watchdog* nicht rechtzeitig eine *Heartbeat*-Nachricht empfängt, etwa durch Fehler in der Kommunikation oder den Ausfall des kompletten Systems, wechselt Tisch bzw. Modul in den Timeout-Modus. Das Modul geht in einen sicheren Halt über und der Tisch setzt die dem Modul ausgefallene Bucht in einen Warn-Zustand.

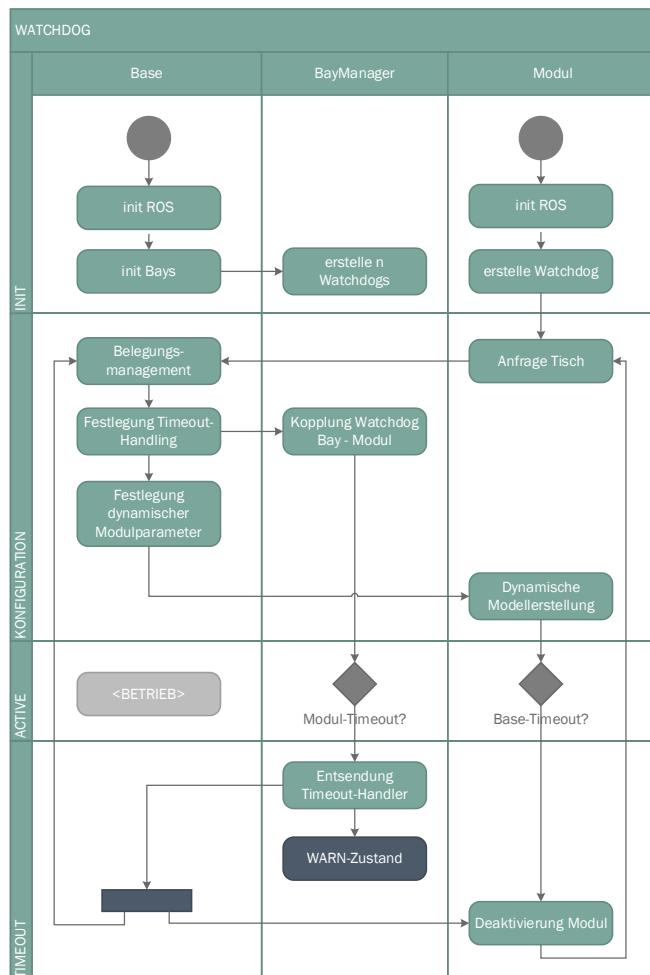


Abbildung 25: Ablauf der Überwachung von Modul und Tisch mittels Watchdogs

Framework für Prozess-/Ressourcenrepräsentation

Die entwickelte Software baut auf dem Product-Process-Resource Ansatz auf [36, 56, 57]. Produkten ist ein (Montage-)Prozess zugeordnet, dessen individuelle Arbeitsschritte (Tasks, Aufgaben) durch Ressourcen durchgeführt wird. Die Abbildung von Prozessen auf Ressourcen basiert auf einer hierarchischen Tätigkeitsdarstellung aus dem Kontext des Plug-and-Produce [40, 58]. Ressourcen verfügen dabei über Fähigkeiten, welche notwendig sind, um spezifische Aufgaben

zu erfüllen. Fähigkeiten können sowohl primitive Grundfunktionen (etwa *Greifer öffnen* oder *Greifer schließen*) als auch komplexere oder aus Primitiven zusammengesetzte Tätigkeiten sein (etwa *Pick-and-Place*). Die Zuordnung von Tasks auf Ressourcen geschieht anhand der Skills und deren Eigenschaften (*Properties*). Die in den Aufgaben hinterlegten Fähigkeiten müssen entsprechend des Prozesses parametrisiert werden, wodurch generische Tätigkeiten spezifisch der Aufgabe zugeordnet werden (etwa das notwendige Drehmoment für eine Schraubverbindung oder das Gewicht eines zu bewegenden Bauteils). Diese Eigenschaften müssen in gleichem Maße in den Fähigkeiten der Ressourcen vorhanden sein (maximales Drehmoment eines Schraubendrehers, Tragkraft eines Roboterarms). Abbildung 26 zeigt den Zusammenhang von Produkt, Prozess (welche direkt als Sammlung von Tasks dargestellt sind), Ressource sowie die Integration der Aufgaben (Skills) und Eigenschaften (Property) in diese Logik.

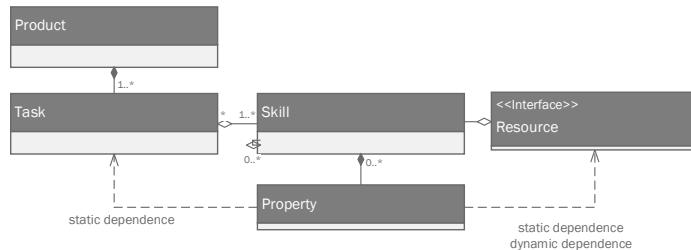


Abbildung 26: Zusammenhang von Produkt, Prozess, Ressource sowie Aufgaben (Task) und Fähigkeiten (Skill) (in Anlehnung an [59])

Algorithmus für Ressourcenanforderung

Die Verteilung der Tätigkeiten an Ressourcen folgt einem dezentralen Ansatz, bei welchem der Tisch die aktuell vom Prozess geforderte Tätigkeit an sämtliche Module leitet und deren Antworten vergleicht. In dem entwickelten Softwareframework übernimmt diesen Abgleich der *Process-Manager*. Dieser stellt eine Anfrage an die individuellen *TaskManager* der Module, welche eine interne Kostenschätzung betreiben. Hierfür verfügt jedes Modul über *SkillActions*, welche jeweils eine individuelle Tätigkeit verwalten. Abbildung 27 zeigt das bereits eingeführte PPR-Konzept erweitert um die Manager-Klassen und das Modul mit seinen *SkillActions*.

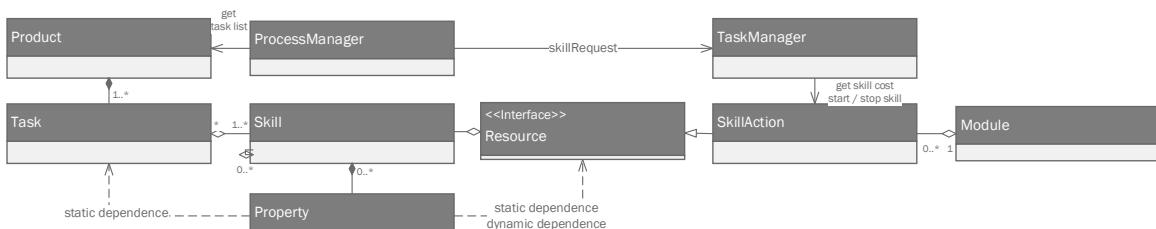


Abbildung 27: Erweiterung des PPR-Konzeptes um PassForM-spezifische Module für die Zuweisung von Aufgaben an Ressourcen. Module stellen diese Ressourcen in Form spezifischer SkillActions für die Ausführung individueller Tätigkeiten dar.

Die Forderung der Ressourcen folgt einem einheitlichen Ablauf, bei dem zunächst eine globale Anfrage als Broadcast an sämtliche Module gesendet wird. Diese Anfrage besteht aus der parametrisierten Tätigkeit, sowie der Prozess sie aktuell fordert und wird durch einen einzigartigen Identifier zur Laufzeit spezifiziert. Code 2 zeigt den Aufbau einer entsprechenden SkillRequest-Nachricht.

```
passform_msgs/SkillType skilltype # general skill information
string target_id # uuid of part to be affected (robot, part, effector, ...)
rcl_interfaces/Parameter[] required_parameter # list of required parameter
rcl_interfaces/Parameter[] optional_parameter # list of optional parameter
passform_msgs/Condition condition # geometric conditions for the task
string request_id # uuid of the request
```

Code 2: Aufbau der SkillRequests-Nachricht

Sämtliche Module empfangen diese Nachricht und überprüfen intern, ob und wie sie diese Tätigkeit ausführen können. Hierfür prüfen sie zunächst, ob die Tätigkeit allgemein abgebildet werden kann und ob die geforderten Parameter erfüllt werden können. Anschließend plant es die Ausführung und ermittelt dabei die geschätzte Dauer und andere Informationen, wie etwa den frühesten Starttermin und den Energiebedarf. Diese Werte antwortet das Modul mit Bezug auf die `request_id` an den *ProcessManager*. Code 3 zeigt den Aufbau der Antwort-Nachricht.

```
string request_id          # uuid of the request
string skill_uuid          # uuid of the skill this response is valid for
string action_topic        # topic to start the action
builtin_interfaces/Duration duration    # total time to perform the skill
builtin_interfaces/Time earliest_start  # epoch of earliest possible start
float32 energy             # consumed energy in Wh
```

Code 3: Aufbau der Cost-Nachricht

Im Abschluss vergleicht der *ProcessManager* sämtliche Antworten und wählt gemäß einem festzulegenden Kostenvergleich das optimale Angebot.

Darstellung von Montageprozessen

Eine in der Literatur verbreite Darstellung greift auf hierarchische Fähigkeiten zurück und verbindet diese sequenziell in Form eines endlichen Zustandsautomaten (Finite State Machines, FSM) [60 bis 65]. Ihr Vorteil ist die einfache Verständlichkeit für Bedienende, sowie die Möglichkeit die chronologische Reihenfolge und die hierarchische Struktur des Prozesses in visuellen Beschreibungen anzupassen. Andere Ansätze nutzen BehaviorTrees, was Vorteile bei der Entwicklung und Durchführung komplexen Verhaltens mit sich bringt [59, 66 bis 68]. Diese Bäume bilden das Verhalten endlicher Automaten als gerichteten Graphen dar und eignen sich für die Darstellung einfacher Prozesse und komplexer Verhalten. Sie bestehen aus einen Anfangsknoten (root), an welchem unterschiedliche Knoten angebunden werden. Die Bäume können beliebig weit verzweigt sein, wobei jeder Endknoten eine auszuführende Aktion beschreibt. Dekorateuren oder Kontrollknoten, welche in den Ästen des Baumes platziert werden, verändern das Verhalten darauffolgender Knoten. BTs ermöglichen erstens eine modularere Struktur, indem das Verhalten in einzelne Komponenten unterteilt wird, die unabhängig voneinander entwickelt, getestet und wieder verwendet werden können. Zweitens erlauben sie reaktives Verhalten, da sie es ermöglichen, auf Ereignisse zu reagieren und bei Bedarf zu vorherigen Zuständen zurückzukehren, was die Flexibilität und Anpassungsfähigkeit des Systems erhöht. Dies erlaubt insbesondere autonomes Verhalten mit vielen Übergangen und Abhängigkeiten [69].

Entsprechend werden auch in PassForM BehaviorTrees für die Prozessdarstellung und –bearbeitung genutzt. Kombiniert mit oben beschriebenen Parametrierung erlaubt dies flexibel gestaltete Prozesse [59, 66], bei denen sowohl die Zuweisung der Akteure frei wählbar ist. Die Darstellung von Prozessen erfolgt mittels verketteter Verhalten, wobei jedes Verhalten einer Tätigkeit gemäß Abbildung 24 entspricht. Die Hierarchiestufe spielt hierbei keine Rolle, sondern ermöglicht ein optionales Fehlermanagement. Der Verhaltensbaum kann derart gestaltet werden, dass zunächst komplexe Tätigkeiten angefordert werden und sollten diese nicht verfügbar sein, eine Anfrage

nach den potenziell untergeordneten Tätigkeiten erfolgt. Ein Beispiel ist die erste Anforderung an „Pick and Place“, welche anschließend auf „Pick“ gefolgt von „Place“ aufgeteilt wird. Sollte dies auch nicht von den Modulen angeboten werden, so könnte im letzten Schritt „Pick“ weiter aufgeteilt werden in „Grasp“ und „Move“.

Framework für den erweiterbaren digitalen Zwilling

Ein Digitaler Zwilling (Digital Twin, DT) ist die digitale Repräsentation eines physischen Objektes, mit dem es bidirektional verbunden ist. Es gibt eine Vielzahl unterschiedlicher Definitionen des DT, die sich auf verschiedene Aspekte konzentrieren, u.a. den Lebenszyklus des Produkts, die Komplexität und Detaillierung der Modellierung oder Simulation, den Zweck des Einsatzes oder den Informationsaustausch [70]. Eine produktionsbezogene Definition beschreibt DTs als "[...] eine virtuelle Repräsentation eines Produktionssystems, auf dem verschiedenen Simulationsdisziplinen ablaufen können und welches durch die Synchronisation zwischen dem virtuellen und dem realen System gekennzeichnet ist [...]" [70]. Bezüglich der Synchronisation unterscheidet [71] zwischen Modell, Schatten und Zwilling und klassifiziert sie je nach automatischem oder manuellem Dateninformationsfluss. Ein Modell bietet keinen automatischen Datentransfer, während bei einem Schatten das virtuelle Objekt hinsichtlich Veränderungen in der physischen Welt automatisch aktualisiert wird und beim Zwilling das virtuelle Objekt das physische Objekt beeinflusst.

Die Umsetzung des DT geschieht einerseits mittels der oben beschriebenen Verwaltungsschalen, welche sämtliche Eigenschaften und Beschreibungen der Module sammeln und verfügbar machen und andererseits als Echtzeitabbildung des Systems. Auf diese Weise kann jederzeit der geometrische Zustand sämtliche Module abgeleitet und eine virtuelle Repräsentation des Systems erstellt werden. Gemäß dem Grundsatz der bi-direktionalen Kommunikation sollte diese auch zu Steuerungszwecken genutzt werden. In PassForM sind hierfür sämtliche Module zunächst mit einem kinematisierten Modell versehen, welches sowohl die Geometrie als auch die Bewegungen des Roboters darstellt. Gelenke sind in ihren Freiheitsgraden beschrieben und ihre Stellung kann aus den Sensorinformationen abgeleitet werden. Module und Produkte verfügen über eigene Koordinatensysteme, welche in einem globalen Koordinatensystem zusammengeführt werden. Positionen und Bewegungen können durch das globale System einerseits global verständlich und andererseits durch die Nutzung von sprachlichen Identifizieren simpel ausgedrückt werden. Bewegungen müssen hierdurch nicht mehr mit festen Koordinaten in X,Y,Z beschrieben sein, sondern können sich an Objekten und Modulen orientieren. Abbildung 28 zeigt ein exemplarisches Beispiel für ein System aus drei Modulplätzen, wobei auf einem Modul ein Objekt liegt (F_o) und auf einem anderen Modul ein Greifarm. Dieser ist mit seiner Basis an Position F_b fixiert und verfügt über einen Endeffektor an F_e . Soll nun ein Objekt gegriffen werden, ist keine Definition von Koordinaten notwendig, sondern lediglich die Information, welches Objekt das Ziel ist. Die globale Position im Weltsystem F_w kann daraus abgeleitet werden.

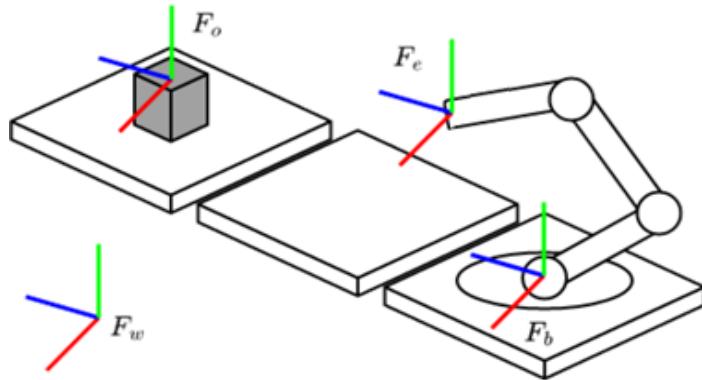


Abbildung 28: Schematische Darstellung eines Systems aus drei Modulen, einem Objekt an F_o , einem Roboter an F_b mit einem Endeffektor an F_e und dem Weltkoordinatensystem F_w .

Der geometrische DT wird in ROS2 umgesetzt und die verschiedenen Komponenten als individuelle Softwarepakete (packages) entwickelt. Für die Abbildung verfügen sowohl der Tisch als auch jedes Modul über eine digitale Repräsentation des geometrischen Aufbaus und der kinematischen Zusammenhänge in Form von Körpern und Gelenken. Diese Systembeschreibung liegt in Form einer URDF-Datei (Unified Robot Description Format) im XML-Format vor. Aufbauend auf dieser Beschreibung veröffentlichen der Tisch und jedes Modul regelmäßig Nachrichten über den aktuellen Zustand des Modelles und seiner Gelenke, welche durch mit den Gelenkbeschreibungen verbundenen Sensoren aktualisiert wird. Die geometrisch klar definierten Modulaufnahmen stellen eine eindeutige Lokalisierung der Module im Raum sicher. Die Konstruktion des Gesamtmodells ist durch die Verkettung sämtlicher Robotermodelle und ihrer gemeinsamen Basisgelenke möglich. Nach der Registrierung eines Moduls am Tisch wird der Modulursprung auf die entsprechende Bucht-Position gesetzt und die Modelle miteinander verknüpft. Sobald sich ein Modul vom Tisch abmeldet, wird auch sein Modell aus dem Gesamtmodell entfernt.

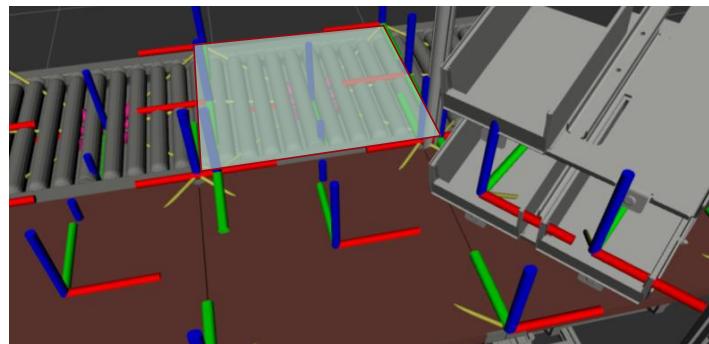


Abbildung 29: Darstellung von Points of Interest (aus dem Kreuz der jeweils eines roten, grünen und blauen Strichs) sowie eines daraus zusammengesetzten Bereiches (graue Fläche).

Benutzerschnittstelle

Um den Zustands der Montagestation und den Fortschritt des Montageprozesses zu überwachen wurde eine Benutzerschnittstelle definiert. Über diese Schnittstelle können einerseits Informationen über die Buchten und Module der Montagestation bereitgestellt. Zusätzlich wird der geplante Montageprozessablauf und der aktuelle Status übermittelt. Das System verfügt über eine statische und eine dynamische Schnittstelle für die Kommunikation und Anzeige der Daten auf der

Benutzeroberfläche (siehe AP4). Statische Daten, welche keine hochfrequente Übermittlung benötigen, werden über die BaSys4.0 Datenbanken, implementiert mittels BaSyst, abgefragt. Dazu zählen beispielsweise die Status-Informationen zum Tisch und den Modulen, wie aktivierte Versorgungsspannungen in den Buchten, darin vorhanden Module sowie deren verfügbare Skills. Die Übertragung dynamischer Daten, die sich häufig ändern können, oder kontinuierlich mit hoher Frequenz übermittelt werden, ist über eine ROS2-WebSocket-Verbindung über mit der JavaScript-Bibliothek `roslibjs`⁷ realisiert. Hierrüber werden unter anderem Heartbeat-Signale der Module, aber auch die aktuellen Montageprozess-Informationen an die Benutzeroberfläche übertragen. Zusätzlich werden auch Steuerungsbefehle im Montageprozess von der Benutzeroberfläche an das System zurückgesendet.

Abbildung 30 zeigt den Ablauf der Datenübertragung beim Abrufen der Statusinformationen des Tisches bzw. dessen Buchten sowie der angemeldeten Module über die Status-Seite. Bei Aufrufen der Seite werden die in der BaSyst-Registry registrierten Teilsysteme (Tische und Module) angefragt und mit den erhaltenen UIDs für jeden der erhaltenen Tische und Module die Detailinformationen von dem BaSyst Server abgerufen und über die Benutzeroberfläche angezeigt. Zusätzlich wird über die ROS-Schnittstelle für jeder der Module der Heartbeat überwacht und in Echtzeit angezeigt.

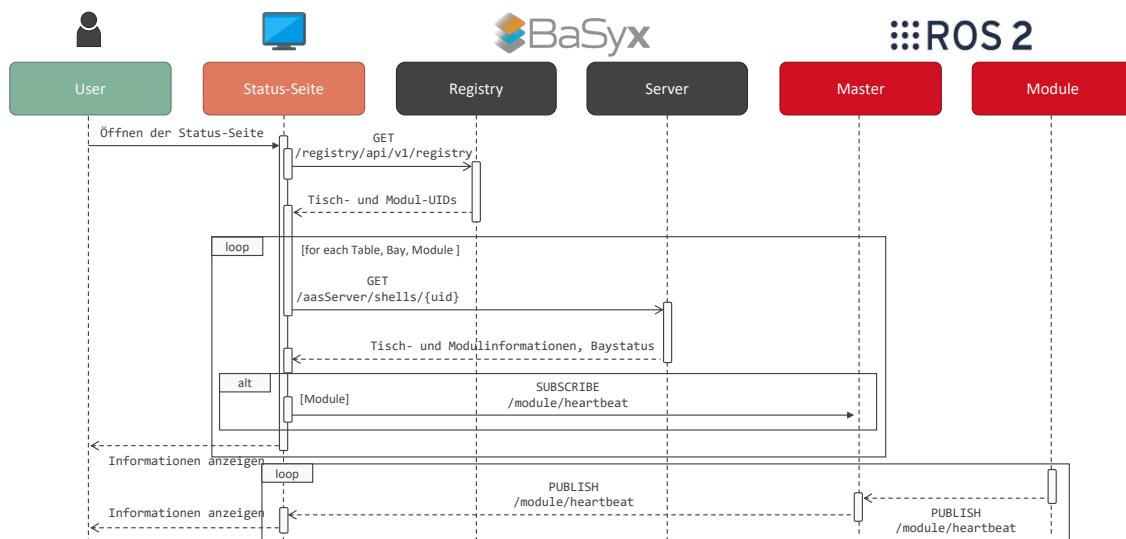


Abbildung 30: Sequenzdiagramm zur Darstellung der Tisch- und Modul-Statusinformationen

Wird auf der Status-Seite ein Modul ausgewählt, wechselt die Nutzeroberfläche zur Modul-Seite, auf der die Detailinformationen angezeigt werden. Der Ablauf hierfür ist in Abbildung 31 dargestellt. Beim Öffnen der Seite werden die statischen Modulinformationen, wie z.B. die Modul-Skills, über die UID beim BaSyst-Server angefragt und dargestellt. Über die ROS-Schnittstelle erfolgt zusätzlich, neben dem Heartbeat-Signal, auch eine kontinuierliche Überwachung des Modul-Inventars. Ändern sich die dynamischen Informationen, so wird vom Modul eine ROS-Nachricht gesendet und die Ansicht aktualisiert.

⁷ <https://github.com/RobotWebTools/roslibjs>

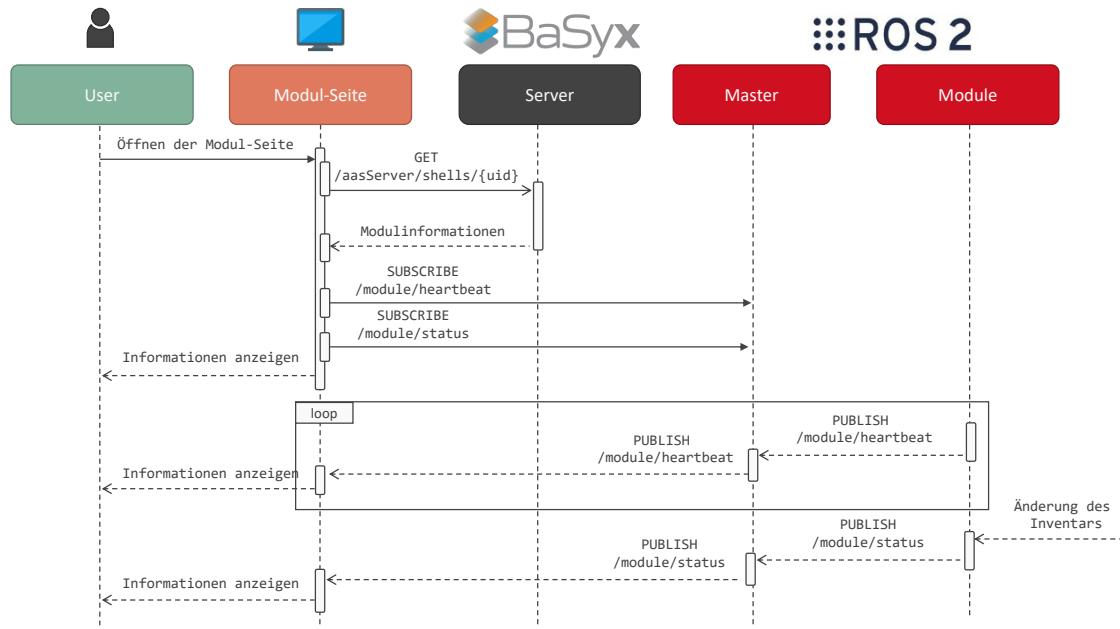


Abbildung 31: Sequenzdiagramm zur Anzeige von Detailinformationen eines einzelnen Moduls

Für die Interaktion mit dem System während des Montageprozesse wurde ebenfalls eine Schnittstelle zum Montagepersonal umgesetzt. Der Datenaustausch zum Montagesystem ist in Abbildung 32 dargestellt. Nach dem Öffnen der Montage-Seite werden bei der BaSyx-Registry die UIDs für den Montageprozess angefragt, dieser im Anschluss als Behaviour-Tree beim BaSyx-Server abgerufen und dem Montagepersonal angezeigt. Für die Anzeige der Informationen zum aktuellen Montage-Schritt (Task) wird außerdem eine Verbindung via ROS hergestellt, über die eine kontinuierliche Aktualisierung der Ansicht erfolgt.

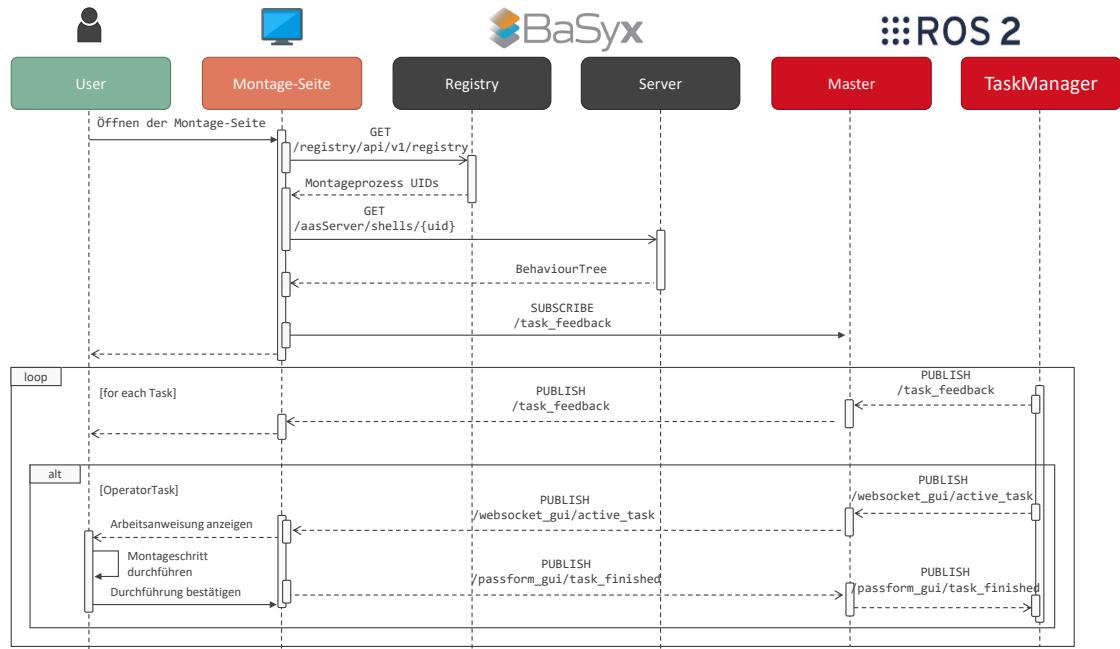


Abbildung 32: Sequenzdiagramm für die Montageprozess-Darstellung

Weiterhin existiert hier die Möglichkeit, das Bedieninterface als „virtuelles“ Modul einzubinden, wodurch das Montagepersonal und seine Fähigkeiten in den Prozess integriert werden können. In diesem Fall werden vom Menschen durchzuführende Montageschritte vom TaskManger als OperatorTask definiert und über ROS an die Nutzerschnittstelle geschickt, wo sie dem Montagepersonal mit einer Arbeitsanweisung angezeigt werden. Nachdem die Anweisung umgesetzt wurde und kann der Montageschritt über die Nutzerschnittstelle bestätigt und eine Nachricht über ROS an den TaskManager geschickt werden.

Zielerreichung

Gemäß Antrag waren für den Abschluss von AP 3 die Entwicklungen einer digitalen Kommunikationsschnittstelle, eines Frameworks für den erweiterbaren Digitalen Zwilling, einer Methode zur Beschreibung und Repräsentation von Prozessschritten, eines Algorithmus zur Erkennung benötigter Ressourcen sowie eines Benutzerinterfaces geplant. Entsprechend der oben ausgeführten Beschreibungen wurden diese Ergebnisse erreicht.

3.4 AP 4: Umsetzung der Anwendungsszenarien

Ziele

Ziel von AP4 ist die Anwendung der entwickelten Frameworks zur Umsetzung der Demonstrationszenarien (Baugruppenmontage variantenreicher Lampen sowie PA-Kundenszenario). Dies umfasst die Modellierung der Simulationsumgebung, die Implementierung von spezifischen Prozessfolgen und Modulfähigkeiten und Inbetriebnahme des Gesamtsystems.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Erstellung der Simulationsumgebung

Sobald sich ein Modul im Tisch registriert, beginnt es mit der Veröffentlichung der geometrischen Information, bestehend aus den Körpern und den zugehörigen Gelenkwinkeln. ROS2 ermöglicht sämtlichen Teilnehmern im Netzwerk (Tisch, Module) auf diese Daten zuzugreifen und sie für interne Planungen und Simulationen zu nutzen. Abbildung 33 zeigt die resultierende Darstellung eines vollständig besetzten PassForM-Systems mit acht Modulplätzen. Die Daten über den aktuellen Zustand des Systems liegen jedem Modul vor, wodurch sie in der Lage sind, das eigene Verhalten an die aktuelle Konfiguration und den Zustand des Systems anzupassen. Auf diese Weise können Trajektorien geplant und auf Kollision geprüft werden. Da sich der DT in Echtzeit mit dem physischen System abgleicht entspricht die geometrische Darstellung der aktuellen Tischkonfiguration. Wird ein Modul aus dem Tisch herausgenommen, entweder indem es zunächst abgemeldet wird oder durch einen Ausfall, wird die Darstellung entsprechend angepasst. Ein abgemeldetes Modul wird aus der Darstellung entfernt, ein abgestürztes wird weiterhin im letzten bekannten Zustand beibehalten.

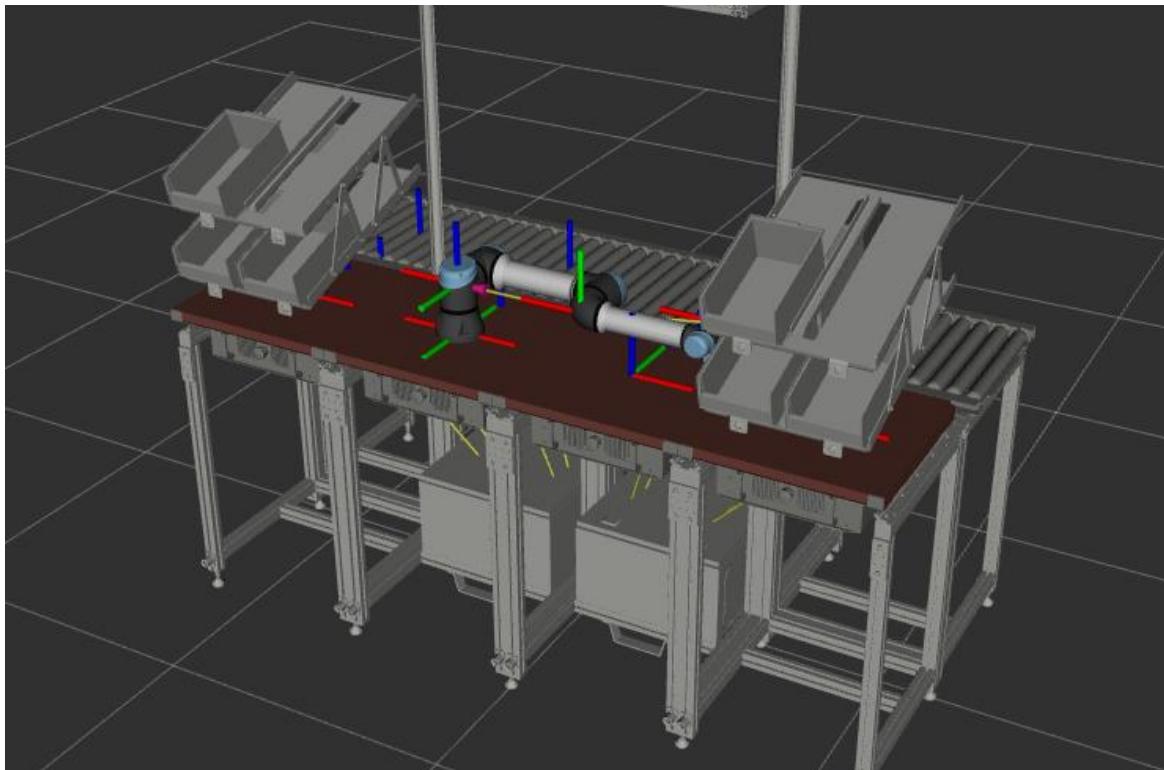


Abbildung 33: Grafische Darstellung des PassForM-DT

Implementierung Modulfähigkeiten

Wie in Kapitel 4 beschrieben, besitzt ein Modul eine *SkillAction* für jede verfügbare Tätigkeit. Sie stellen die Schnittstelle vom *TaskManager* zur tatsächlichen Ausführung der Aktionen und greifen mittels der Treiber auf die Hardware des Moduls zu. Mittels dem *ModulManager* verwaltet das Modul die *SkillActions* und gibt die für die Ausführung notwendige Freigabe. Der *ModulManager* überwacht hierfür die Kommunikation mit dem Gesamtsystem und reagiert auf sicherheitsrelevante Nachrichten und Informationen. Abbildung 34 zeigt ein Modul mit dem *ModulManager* und den verwalteten *SkillActions* eingebettet in das PassForM-Gesamtsystem. Die Umsetzung geschieht mittels verwalteter Nodes aus ROS2, mit welchen einzelne Komponenten über einen internen Zustandsautomaten verfügen, mit welchen sie aus einem Startzustand zunächst konfiguriert und anschließend gestartet und auch wieder beendet werden können⁸.

⁸ http://design.ros2.org/articles/node_lifecycle.html

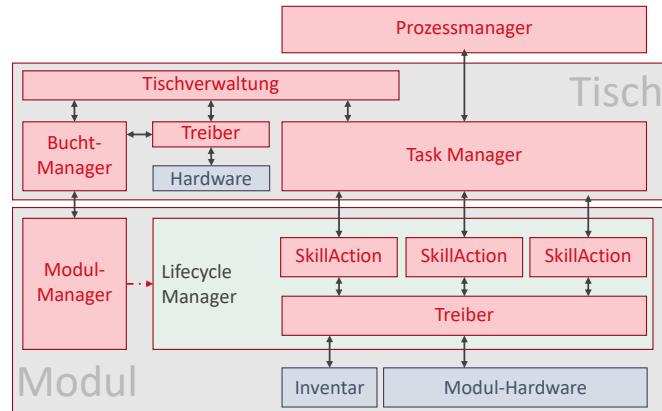


Abbildung 34: Steuerungsarchitektur eines Moduls mit den durch den *LifecycleManager* verwalteten SkillActions und Treiber. Der *ModulManager* kommuniziert mit dem *BuchtManager* des Tisches und steuert den *LifecycleManager*.

Die Verwaltung der *SkillActions* und Treiber übernimmt ein *LifecycleManager*. Module starten zunächst im Zustand *unconfigured* und konfigurieren sich anhand intern hinterlegter Konfigurationsdateien. Hierzu gehören die geometrische Beschreibung des Moduls, Informationen über verfügbare Fähigkeiten und deren Parameter sowie der Treiber zur Ausführung der Fähigkeiten. Anschließend wird ein Watchdog zur Überwachung der Kommunikation mit dem PassForM-System gestartet. Für seine Aktivierung sendet das Modul nach der Identifizierung des Systems eine Registrierungsanfrage mit modulspezifischen Parametern (vgl. Abbildung 25). Der Tisch registriert den Watchdog des Moduls und antwortet mit einer Handshake-Nachricht, welche die dynamischen Modulparameter wie die Position im Gesamtsystem und die aktivierte Versorgung angibt. Mit der Antwort auf die Registrierungsanfrage wird das Modul in den Zustand *active* versetzt, der die Ausführung von Fähigkeiten erlaubt. Der Ausfall des Watchdogs, ein Not-Halt-Signal, oder die Initiierung der Abschaltung von Modul oder Tisch leitet die Deaktivierung ein, welche die Ausführung von Fertigkeiten unterbindet. Abbildung 35 zeigt eine Modulregistrierung mit dem folgenden Start des *LifecycleManagers* und Treibers sowie die Stopfsequenz im Falle eines Ausfalls.

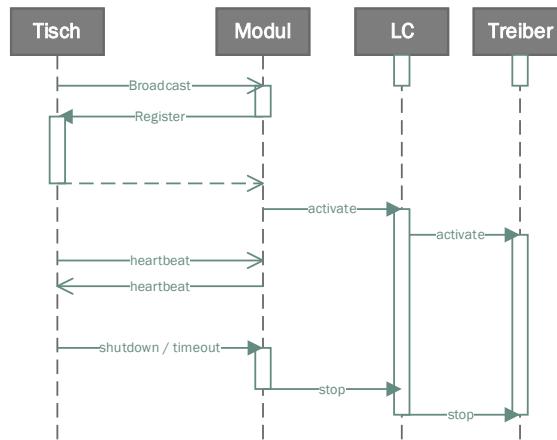


Abbildung 35: Sequenzdiagramm einer Modulregistrierung mit darauf folgendem Start des *LifecycleManagers* (LC) und des Treibers. Bei shutdown-Signal sowie bei einem Timeout wird stoppt der LC und sendet dieses Signal auch weiter an die Treiber.

Die Ausführung der Tätigkeiten ist hierarchisch implementiert und geschieht mittels *SkillActions* und *SkillActionComposites*. Während *SkillActions* elementare Tätigkeiten darstellen, kombinieren

SkillActionComposites mehrere elementare *SkillActions* und führen sie in einer festgelegten Ordnung aus. Hierfür leiten sie Anfragen intern an *SkillActions* weiter, welche damit die einzige Komponente sind, welche auf die Treiber zugreifen kann (Abbildung 36).

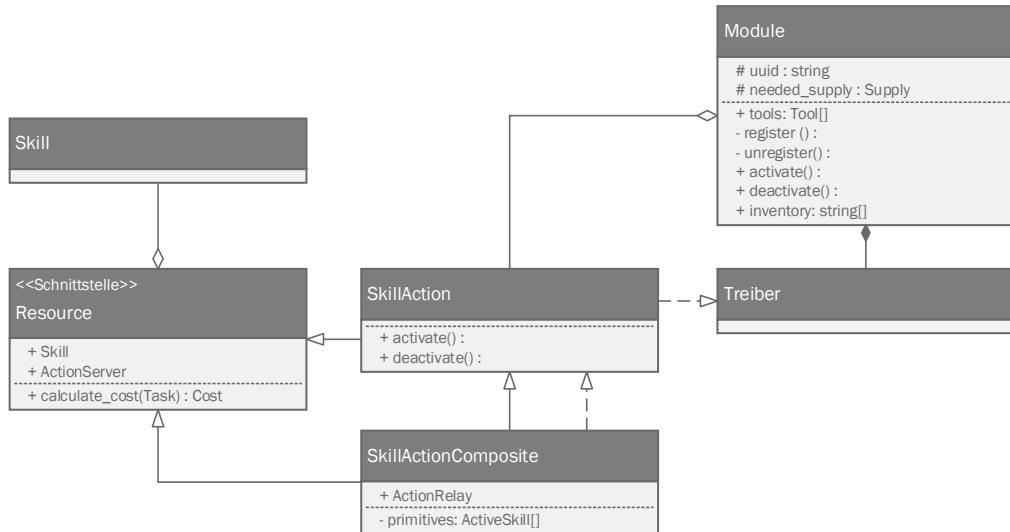


Abbildung 36: Klassendiagramm der im Modul vorhandenen Ressourcen in Form von SkillAction und SkillActionComposite. SkillActions greifen direkt auf die Treiber zu und führen Tätigkeiten aus.

Aufbauend auf dieser Struktur wurden die entwickelten Module mit unterschiedlichen Tätigkeiten ausgestattet.

Modul	Composite	SkillAction	Kommentar
Conveyor		Grasp	Automatisch, falls Objekt auf Modul. Legt Objekt in Inventar
Conveyor		Move	Bewegung nur in feste Richtung
Conveyor		Release	Gibt Objekt aus Inventar frei
Conveyor	Pick, Place	Grasp, Move, Release	
Material	Store		Legt Objekt in Inventar
Material	Provide		Pick-by-Light Anzeige des Objekts. Entfernt Objekt aus Inventar.
Robot		Grasp	Greifbewegung schließen.
Robot		Move	Bewegung Endeffektor
Robot		Release	Greifbewegung öffnen.
Robot	Pick, Place	Grasp, Move, Release	
Operator		Grasp	Nehmen eines Objekts.
Operator		Move	Bewegen eines Objekts.
Operator		Release	Loslassen eines Objekts.
Operator	Pick, Place	Grasp, Move, Release	
Operator	Mount	Grasp, Move, Position, Release	
Operator	Plug	Grasp, Move, Pressure	
Operator		Position	Ausrichten eines Objekts.

Operator	Pressure	Andrücken eines Objekts.
Operator	Screw	Einschrauben mittels Akkuschrauber.
Operator	Tool_get	Nehmen eines Werkzeugs.
Operator	Tool_use	Nutzen eines Werkzeugs.
Operator	Tool_put	Loslassen eines Werkzeugs.

Erstellung Prozessrepräsentation

Die Abbildung der Montageprozesse geschieht wie oben ausgeführt als BT. Die Verwaltung ist mittels BehaviorTree.CPP⁹ implementiert und stellt den *ProcessManager* gemäß der Gesamtarchitektur. Es bietet sowohl eine Integration in ROS2 als auch eine grafische Oberfläche mittels Groot¹⁰. Ein spezieller PassForM-Knoten beschreibt die Ausführung einer Tätigkeit. In diesem Knoten wird der TaskManager aufgerufen, welcher für die Verteilung der Tätigkeit an die Module verantwortlich ist und die Überwachung der Tätigkeit übernimmt. Abhängig vom Resultat der Tätigkeit meldet der TaskManager den Erfolg oder das Scheitern der Tätigkeit an BehaviorTree.CPP, welches entsprechend der im Verhaltensbaum integrierten Logik die nächste Tätigkeit oder bei einem Scheitern das eventuell hinterlegte Korrekturverhalten startet. Abbildung 37 zeigt die beispielhafte Implementierung einer simplen Montagefolge aus zwei Pick-and-Place Tätigkeiten, gefolgt vom Aufstecken eines weiteren Bauteils.

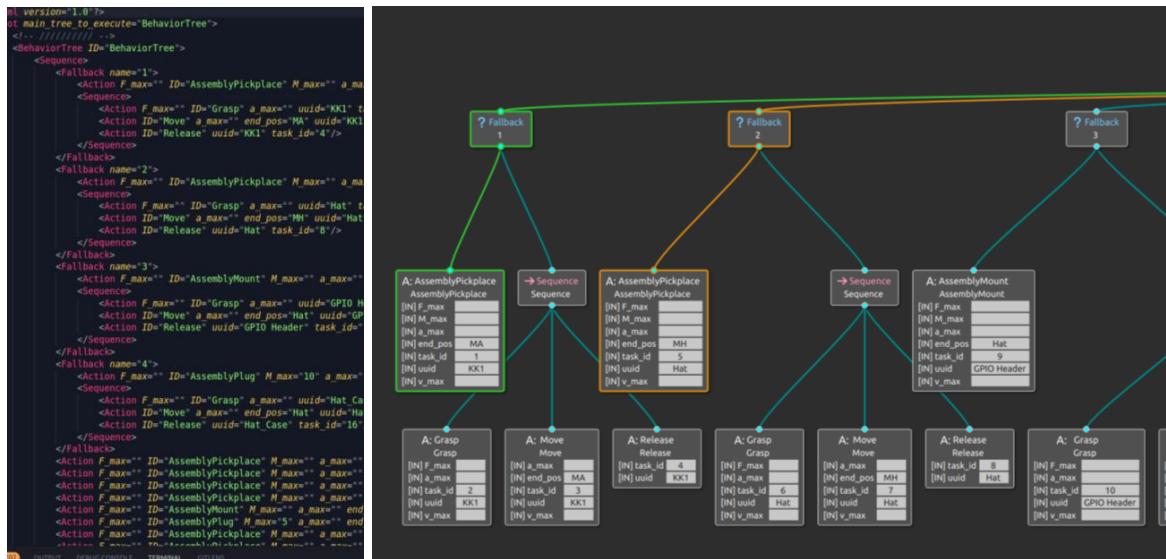


Abbildung 37: Prozessdarstellung als BehaviorTree. Links ein Ausschnitt des Beschreibungscodes, rechts die Darstellung als Baum.

System- und Montageprozessvisualisierung

Für die Umsetzung der in AP 3 definierten Schnittstelle zur Kommunikation zwischen System und Arbeitenden wurde eine Benutzeroberfläche auf Basis von HTML- und JavaScript erstellt. In dem Dashboard kann über einen Web-Browser der Systemzustand des Tisches, bzw. seiner Buchten,

⁹ <https://github.com/BehaviorTree>

¹⁰ <https://github.com/BehaviorTree/Groot>

und der Module überwacht werden. Darüber hinaus lässt sich der Montageprozess visualisieren und es kann eine Interaktion zwischen Montagepersonal und System stattfinden.

In Abbildung 38 ist die Übersichtsseite zur Darstellung des Systemzustands zu sehen. Hier werden die acht Buchten des Tisches angezeigt und für den Fall, dass sich ein Modul in der Bucht befindet, auch deren Visualisierung. Für jede der acht Buchten des PassForM-Tisches wird die anliegende Spannungsversorgung dargestellt. Neben den grundsätzlich vorhandenen 24 V DC werden im Fall der achten Bucht auch 230 V AC bereitgestellt. Eine farbliche Hervorhebung auf Seite des Moduls zeigt hier, dass diese benötigt wird, auf Seite der Bucht, dass diese freigeschaltet wurde und an den Kontakten anliegt. Für die Module werden neben einer grafischen Abbildung des Moduls auch deren Bezeichnung und Skills in Form von Piktogrammen angezeigt. Ein blinkender, farbiger Punkt zeigt zusätzlich an, ob die Module ein Heartbeat-Signal senden und gibt so Aufschluss über deren Verfügbarkeit und eventuelle Probleme.

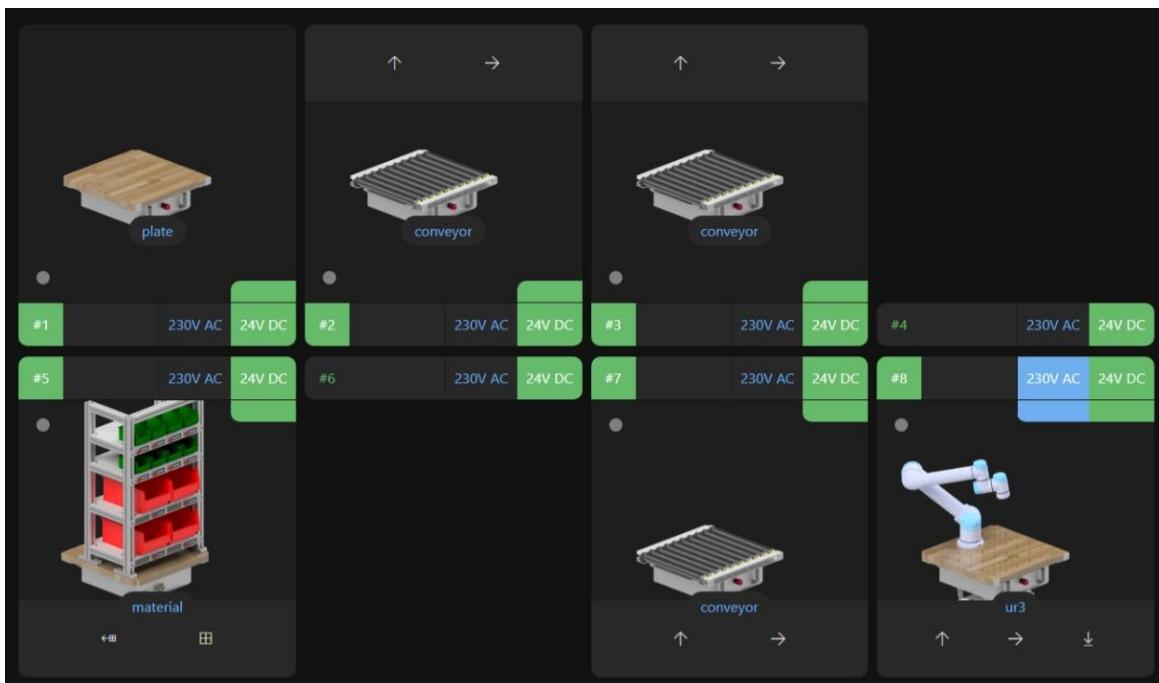


Abbildung 38: Systemvisualisierung der aktuell angeschlossenen Module und deren aktiver Spannungsversorgung. Fähigkeiten der Module sind als Piktogramme dargestellt.

Weitere Informationen zu den einzelnen Modulen können durch einen Klick auf deren jeweilige Repräsentation aufgerufen werden. Auf der in Abbildung 39 dargestellten Detailseite werden weitere Moduleigenschaften aufgeführt. Weist ein Skill bestimmte Parameter auf, wie z.B. eine Fördergeschwindigkeit, werden diese hier dargestellt. Zusätzlich werden dem Modul zugeordnete Objekte im Inventar aufgeführt und über die ROS-Schnittstelle kontinuierlich aktualisiert. Das können Bauteile sein, die sich zur Bearbeitung im Einflussbereich des Moduls befinden, oder im Fall des dargestellten Moduls zur Materialbereitstellung um Montagematerial, auf das vom Personal im Montageprozess zurückgegriffen wird.

Informationen zum Montageprozess werden über die Benutzeroberfläche in Abbildung 40 angezeigt. Dort werden auf der linken Seite die aufeinanderfolgenden Montageschritte dargestellt. Ein Icon kennzeichnet, ob diese bereits abgeschlossen wurden (✓) in Bearbeitung sind (⟳) oder noch nicht begonnen wurden (...).

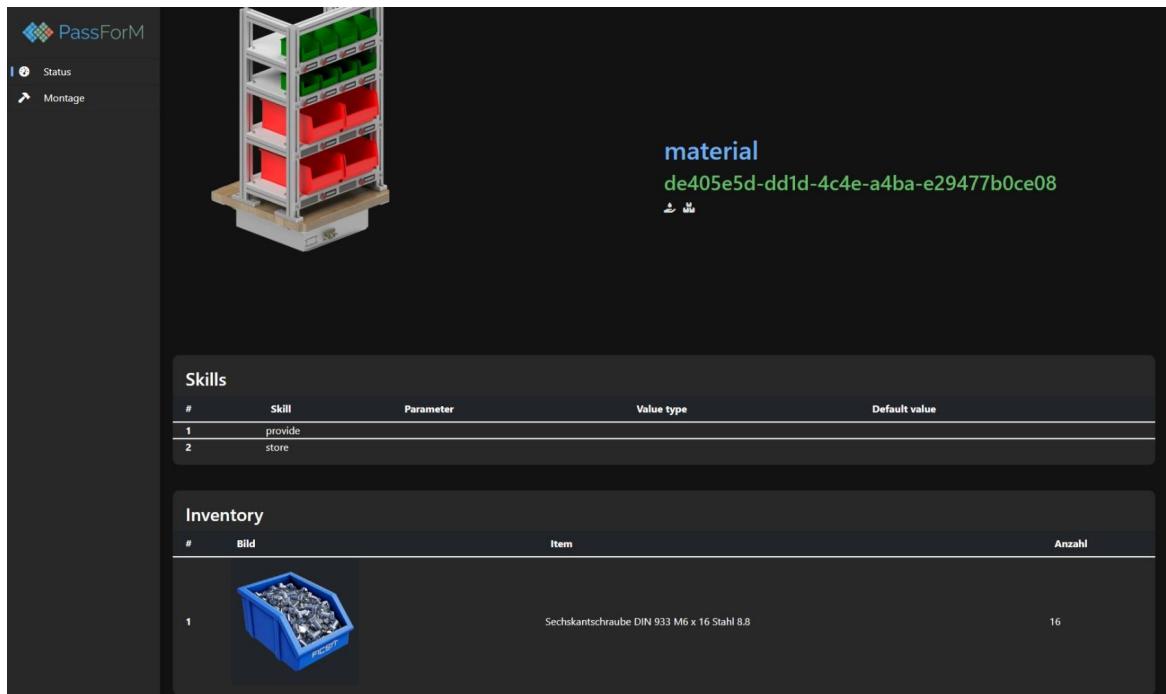


Abbildung 39: Modulardarstellung mitsamt den verfügbaren Skills und dem Inventar des Moduls

Handelt es sich bei dem aktuellen Montageschritt um eine manuelle Tätigkeit, werden die Instruktionen hierzu angezeigt. Neben der Tätigkeitsbeschreibung wird das zu manipulierende Bauteil sowie rechts daneben das Ergebnis des Montageschritts visualisiert. Zusätzlich sind darunter evtl. vorhandene, wichtige Hinweise angegeben. Ist der Arbeitsschritt abgeschlossen, kann diese Information über eine Schaltfläche am unteren Bildschirmrand an das System übermittelt werden.

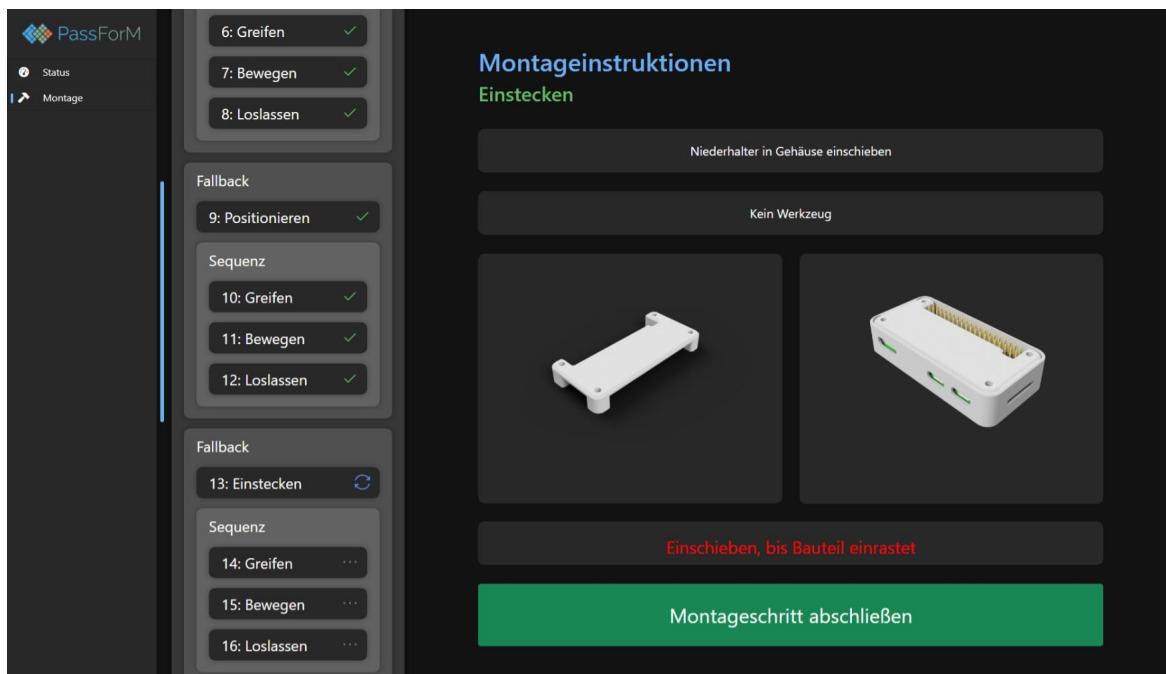


Abbildung 40: Visualisierung des aktuell ablaufenden Montageprozess und Instruktionen für den aktuellen Montageschritt im Falle einer manuell auszuführenden Tätigkeit.

Zielerreichung

Gemäß Antrag waren für den Abschluss von AP 4 die der Aufbau eines funktionsfähigen Demonstrators geplant. Dieser soll über einen erweiterbaren DT verfügen und sich bei Kopplung von Modulen korrekt erweitern. Entsprechend der oben ausgeführten Beschreibungen wurden diese Ergebnisse erreicht.

3.5 AP 5: Test und Optimierung

Ziele

In diesem AP werden alle Softwarekomponenten, ihr Zusammenspiel im Gesamtsystem und in den Anwendungsszenarien getestet. In den einzelnen Testphasen erfolgen jeweils Datenaufnahme, Evaluierung und Optimierung, sodass das System kontinuierlich verbessert wird.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Funktionstests

Die Funktionalität der einzelnen Komponenten wurde durch individuelle Tests validiert. Für den erweiterbaren DT wurden sowohl Tests für die Systembeschreibung mittels der VWS als auch die geometrische Beschreibung mittels ROS2 durchgeführt. In beiden Fällen ist das System in der Lage, neu eingesteckte Module korrekt zu erkennen und in die jeweilige Beschreibung einzubinden. Bei Abmeldung eines Moduls wird die Beschreibung korrekt entfernt. Im Falle eines Time-outs, etwa aufgrund eines Modulausfalls, wird die Bucht erwartungsgemäß gesperrt und die Daten auf inaktiv gesetzt.

Weiterhin wurden Tests der eingebauten Sensoren und Aktoren durchgeführt. Die korrekte Einbindung der Sensoren in den DT konnte mittels der drehbar gelagerten Materialbereitstellung nachgewiesen werden. Die Drehung wird mittels eines Drehwinkelsensors ermittelt und vom Treiber an das Modul übermittelt. Dieses rechnet die Messwerte um und integriert sie sowohl in den geometrischen Zwilling als auch die VWS-Darstellung mittels BaSyx. Hierdurch entspricht der DT jederzeit dem physischen Systemzustand. Die Ansteuerung der Aktorik konnte mit dem Fördertechnikmodul gezeigt werden, welches in der Lage ist, Objekte über eine festgelegte Distanz, welche aus Koordinaten im der geometrischen Systembeschreibung abgeleitet wurde, zu fördern. Hierbei ist anzumerken, dass aufgrund mangelnder Sensorik das Modul lediglich gesteuert und nicht geregelt wird. Das bedeutet, dass aktuell keine Rückkopplung der Bewegung, etwa mittels Kameras, an das Modul übertragen wird. Die zurückzulegende Distanz wird zu Beginn errechnet und die Fördertechnik entsprechend der Rollengeschwindigkeit und der zu erwartenden Reibung zwischen Rollen und Objekt für eine festgelegte Zeit betrieben. Die Bahnplanung des UR3-Moduls ist mittels MoveIt¹¹ integriert und wurde mit den entsprechenden Bibliotheken durchgeführt.

Systemtest

Nach erfolgreichen Funktionstests wurde das PassForM-System in verschiedenen Konfigurationen aufgebaut und das Zusammenspiel der Module überprüft. Hierfür wurden unter anderem Bewegungen zu Objekten im Weltkoordinatensystem durchgeführt sowie die Versteigerung von Tätigkeiten an die Module getestet. Identifizierte Fehler in der Programmierung und dem physischen Aufbau des Systems konnten direkt behoben werden. Hierzu gehörten unter anderem Probleme bei der korrekten Erkennung der Modulposition aus den Netzwerkdaten sowie Schwierigkeiten

¹¹ <https://moveit.ros.org/moveit/ros/humble/2022/06/02/MoveIt-Humble-Release.html>

bei der elektrischen Verbindung der Module. Nach Behebung dieser Fehler waren alle Module in allen Buchten lauffähig und wurden auch vom System korrekt erkannt und integriert. Die Versteigerung von Tätigkeiten im System war erfolgreich. Dies zeigt sich unter anderem daran, dass das Fördertechnikmodul seine Gebote entsprechend der Position im System anpasst und nur eine Ausführung anbietet, wenn Start- und Endpunkt der Bewegung in der eigenen Modulfläche liegt und die Bewegungsrichtung zwischen beiden Punkten zusätzlich der von der eingebauten Fördertechnik abbildbaren Bewegung entspricht (Abbildung 41).

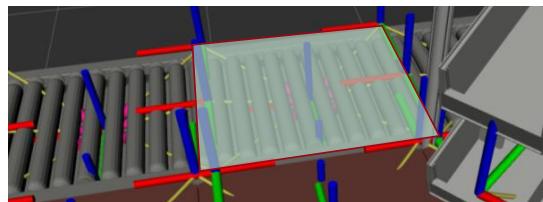


Abbildung 41: Fördertechnik-Modul mit eingezeichnetner Modulfläche. Das Modul gibt nur Gebote für Bewegungen ab, welche einerseits sowohl in der Fläche starten als auch Enden, als auch von links nach rechts oder entgegengesetzt führen.

Evaluierung Anwendungsszenarien

Im Rahmen der Evaluierung der Anwendungsszenarien werden die in AP 1 analysierten Montageprozesse sowie ein weiterer Montageprozess eines Kleincomputers in einem Gehäuse mittels der entwickelten Prozessschritte aufgeteilt und als Verhaltensbaum beschrieben. Abbildung 43 zeigt die für die Montageprozesse genutzten Tätigkeiten. Die Nutzung der hierarchischen Tätigkeitsdarstellung erlaubt eine vereinfachte Beschreibung der Prozessschritte.

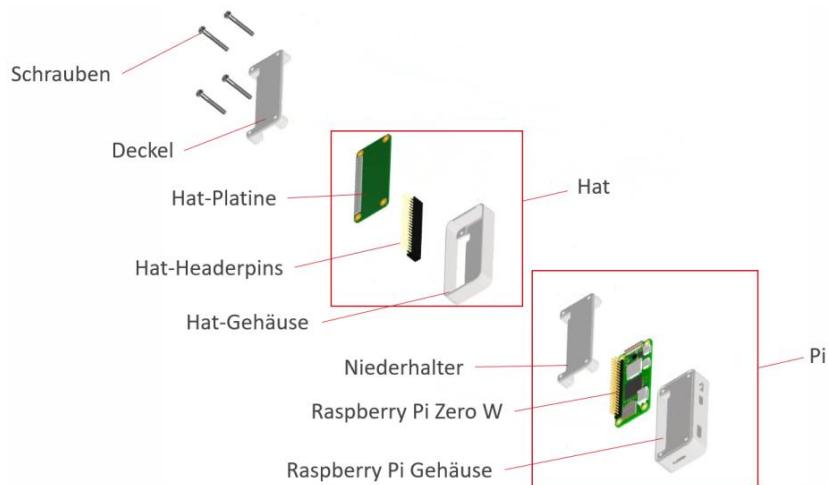


Abbildung 42: Darstellung der Einzelkomponenten und Baugruppen des Evaluierungsszenarios

In Abbildung 42 sind die Einzelkomponenten des modularen Kleincomputers dargestellt, der für die Evaluation konzipiert wurde. Bei der Montage wird zunächst ein Hat aus den drei Einzelteilen Platine, Headerpins und Gehäuse durch einfaches ineinanderstecken zusammengebaut. Nach der Montage des Computers (Pi), bestehend aus einem Gehäuse, der Platine (Raspberry Pi Zero W) und einem Niederhalter, wird einer (oder mehrere) der zuvor montierten Hats auf die Pi-Baugruppe gesteckt, ein abschließender Deckel hinzugefügt und alles über vier Schrauben fest miteinander verbunden. Die Baugruppe deckt eine Vielzahl der am häufigsten vorkommenden Montagetätigkeiten ab.

Die Montagetätigkeiten „Pick“, „Mount“, „Plug“, „Pick & Place“ und „Place“ machen zusammen über 80 % aller beschriebenen Prozessschritte aus. Über alle Beispiele hinweg kann auf diese Art im Schnitt knapp 50 % des Beschreibungsaufwands gegenüber den anderen untersuchten Ansätzen gespart werden. Gegenüber MTM-UAS liegt der Vorteil bei etwa 20 %.

Ein weiterer Vorteil der Darstellung ist die Verknüpfung mit den zu bearbeiteten Bauteilen und Positionen im DT, wodurch zusätzlich der Parametrierungsaufwand sinkt. Auf diese Weise lassen sich jedoch nicht sämtliche Schwierigkeiten in der Parametrierung beseitigen, da insbesondere komplexe Bewegungen mittels Trajektorien beschrieben werden müssen. Dies zeigte sich bei der Modellierung des Montageprozesses der mechanischen Baugruppe, in welcher unter anderem Sicherungsringe aufzustecken sind. Da die Beschreibung der Tätigkeiten auch für eine automatische Ausführung ausreichend sein muss, sind komplexe Bewegungen zum Aufspannen und Aufsetzen der Sicherungsringe notwendig. Weiterhin ist hierfür ein Werkzeug oder spezieller Greifer notwendig, wodurch die Tätigkeit nicht im Rahmen der Evaluation geprüft werden konnte.

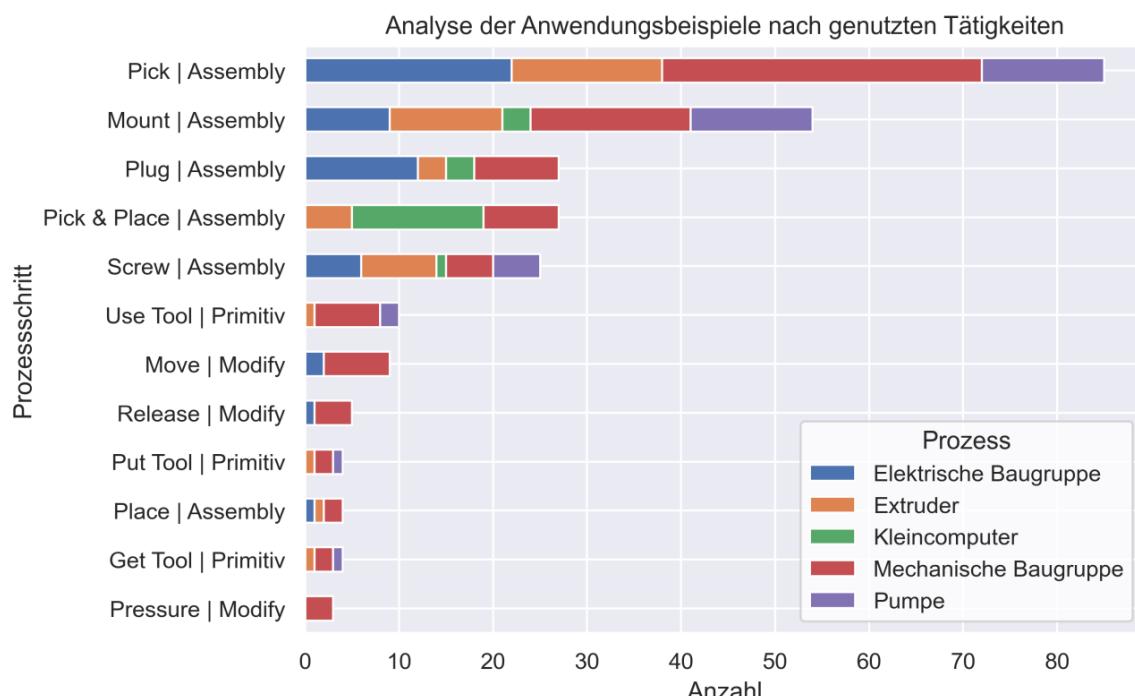


Abbildung 43: Übersicht der abgebildeten Montageprozesse und der für die Prozesse genutzten Tätigkeiten

Vorgehensmodell für Modul- und Prozessentwicklung

Abschließend wurden Vorgehensmodelle für die Entwicklung von Modulen und die Abbildung von Prozessen für die Nutzung in PassForM entwickelt.

Für die Entwicklung neuer Module sind grob vier Schritte notwendig. Dies geht davon aus, dass der Modulkern bereits existiert. Zumeist können hierfür existierende Systeme wie etwa Roboterarme oder andere automatisierte Lösungen herangezogen werden. Darauf aufbauend muss zunächst die Integration der der Hardware in die standardisierte Basis erfolgen. Hierfür kann sowohl auf die Definition der Abmaße und Schnittstellen als auch vorgefertigte CAD-Beschreibungen für die Basis zurückgegriffen werden. Anschließend ist das CAD-Modell des kompletten Moduls mit-

samt seinen Aufbauten abzuleiten und gegebenenfalls zu kinematisieren. Weiterhin sollten besondere Koordinaten wie Bereiche in denen Objekte abgelegt werden können oder Start- und Endpunkte beschränkter Bewegungen wie bei dem Fördertechnikmodul festgelegt werden. Diese Daten stellen den ersten Teil des Exports dar. Anschließend sind die vom Modul auszuführenden Tätigkeiten entsprechend der PassForM-Tätigkeitsbibliothek zu definieren und ebenfalls zu exportieren. Die Parametrierung geschieht durch einfache Textdateien, welche von den PassForM-Bibliotheken importiert werden können. Eine Programmierung in Python oder C++ ist lediglich im letzten Schritt notwendig, in welchem die Durchführung der einzelnen Tätigkeiten auf die Treiber übersetzt wird. PassForM bietet standardisierte Funktionen an, in welchen lediglich die Ansteuerung der Treiber des Modulkerns eingebunden werden muss. Abbildung 44 stellt diesen Ablauf grafisch dar.

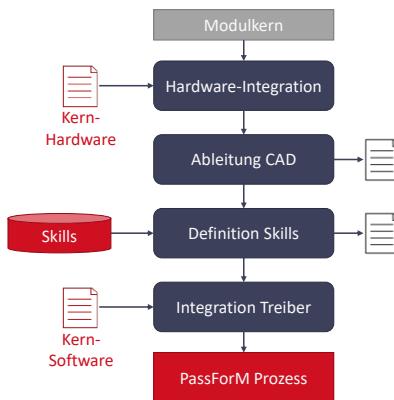


Abbildung 44: Vorgehen für die Erstellung neuer Module

Die Erstellung neuer Prozesse ist ebenfalls in wenigen Schritten möglich. Als erstes müssen die im Prozess genutzten Bauteile beschrieben werden und mit physischen Informationen wie etwa dem Gewicht oder Informationen zur Handhabung (wie „Greifbar über 2-Finger-Greifer“, „Greifbar über Vakuum“, ..) versehen werden. Weiterhin können. Anschließend sind die Prozessschritte gemäß dem PassForM-Katalog zu wählen. Anschließend müssen diese parametrisiert werden, wobei einerseits die Bauteile und eventuelle Positionen der Ausführung festzulegen sind und andererseits die Tätigkeiten gemäß ihren Freiheitsgraden definiert werden müssen. Die Fähigkeit „Schrauben“ benötigt etwa ein Drehmoment, die Fähigkeit „Drücken“ eine Kraft. Abbildung 45 stellt diesen Ablauf grafisch dar.

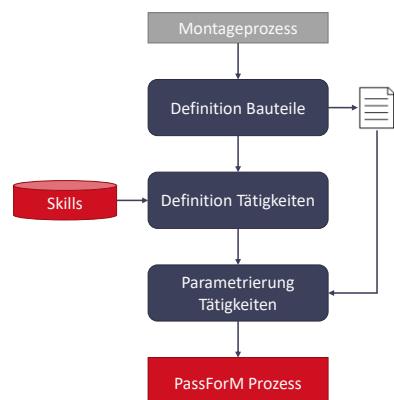


Abbildung 45: Vorgehensmodell für die Erstellung neuer Montageprozesse

Zielerreichung

Gemäß Antrag waren für den Abschluss von AP 5 die Komponenten- und Systemtests durchgeführt und das System evaluiert. Weiterhin wurde der KMU-Leitfaden aus AP 1 entworfen. Entsprechend der oben ausgeführten Beschreibungen wurden diese Ergebnisse erreicht.

3.6 AP 6: Projektmanagement und Öffentlichkeitsarbeit

Ziele

Ziel dieses AP ist zum einen die Organisation und Überprüfung der Projektarbeit sowie zum anderen eine wissenschaftliche und öffentlichkeitswirksame Verwertung der Ergebnisse.

Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Im Rahmen von AP 6 wurde neben dem Projektmanagement die Kommunikation mit den Mitgliedern des PAs, der Forschungsvereinigung Elektrotechnik und weiteren interessierten Unternehmen, die Dokumentation und Berichtserstattung sowie die Verwertung der Projektergebnisse durchgeführt. Die hierbei durchgeführten Transfermaßnahmen sind Kapitel 5 zu entnehmen.

4 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)
 - Stufe HPA-A: 30,2 Personenmonate
- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)
 - Keine
- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)
 - Keine

5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die im Berichtszeitraum durchgeführten Tätigkeiten entsprachen den im Forschungsantrag vorgesehenen Arbeitsschritten und waren für die Erreichung des Forschungsziels erforderlich. Die geleistete Arbeit war für die Durchführung der Arbeitsschritte erforderlich. Die Ausgaben waren für die Durchführung der geleisteten Arbeit notwendig und angemessen.

6 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse

Die im Rahmen des Forschungsprojektes erzielten Ergebnisse bieten einen deutlichen Mehrwert sowohl aus wissenschaftlich-technischer als auch aus wirtschaftlicher Perspektive.

Das entwickelte modulare Montagesystem, das einen schnellen Wechsel von Modulen ermöglicht, indem es diese automatisch erkennt, konfiguriert und in das System einbindet, stellt einen Fortschritt in der Flexibilität und Anpassungsfähigkeit von Produktionssystemen dar. Kombiniert mit der Integration des Menschen für eine dynamische Arbeitsteilung in hybriden Montageprozessen, stellt dies sicher, dass technische Ressourcen optimal genutzt werden und gleichzeitig Personal ergonomisch in die Prozesse eingebunden wird. Die in PassForM entwickelte Lösung verbindet auf diese Weise das Bestreben nach flexiblen und resilienten Produktionssystemen mit den Anforderungen von Bedienenden und Betreibenden. Darüber hinaus gewährleistet die vereinfachte Beschreibung von Montageprozessen durch einen einheitlichen Katalog an Tätigkeiten und standardisierte Parameter eine konsistente und systematische Herangehensweise an die Planung von Montagesystemen und -prozessen. Die Integration der Verwaltungsschale und des

Digitalen Zwilling trägt zur vollständigen Digitalisierung des Systems bei, was den Weg für fortgeschrittliche Analyse- und Optimierungsmöglichkeiten ebnnet.

Aus wirtschaftlicher Sicht bieten die Ergebnisse dieses Forschungsprojektes eine potenzielle Kostenersparnis und Effizienzsteigerung für Unternehmen. Insbesondere ermöglicht die umfangreiche Softwarebibliothek sowie der Modulbaukasten die schnelle Entwicklung neuer Module und die unkomplizierte Beschreibung von Montageprozessen. Dies erlaubt eine rasche Anpassung an neue Produktionsanforderungen, was die Markteinführungszeiten neuer Module und Produkte verkürzen kann. Darüber hinaus stellen die entwickelten Teillösungen die Ausgangsbasis für neue Anwendungen im Bereich der Einbindung von Digitalen Zwillingen, Verwaltungsschalen und modularen Lösungen in anderen Branchen jenseits der Montagestationen, dar.

Diese Ergebnisse sind insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) besonders vorteilhaft. Die Modularität und Flexibilität des Systems ermöglichen es KMU, mit begrenzten Ressourcen eine Vielzahl von Produkten effizient zu produzieren. Die vollständige Digitalisierung durch die Integration von Verwaltungsschale und Digitalem Zwilling bietet KMU die Möglichkeit, ihre Produktion in Echtzeit zu überwachen und anzupassen, was ihre Wettbewerbsfähigkeit in einem dynamischen Marktumfeld fördert. Hier kommen insbesondere die Vorteile der in Pass-ForM entwickelten Standards und Bibliotheken zum Tragen, welche den Entwicklungs- und Integrationsaufwand neuer Lösungen stark reduziert und damit insbesondere Unternehmen unterstützt, welche nur begrenzt Kapazitäten für eigenständige Entwicklungen und Digitalisierungsprozesse jenseits ihrer Kerntätigkeiten haben. Darüber hinaus erleichtert die standardisierte Beschreibung von Montageprozessen die Schulung des Personals und stellt sicher, dass KMU mit begrenzten Schulungsressourcen dennoch eine hohe Produktqualität erreichen können.

Industrielle Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse sind einerseits die Integration und Weiterentwicklung der modularen Montagestation und andererseits die Nutzung von Teilergebnissen wie etwa der Tätigkeits- und Prozessbeschreibung, des Digitalen Zwilling zur geometrischen Beschreibung modularer Systeme, der modularen Verwaltungsschale sowie der Steuerungsarchitektur für modulare Systeme. Die Nutzung der Teilergebnisse ist dabei auch in montagefremden Anwendungsgebieten möglich, da die Ergebnisse jenseits der Tätigkeitsbeschreibung anwendungsagnostisch sind.

7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Rahmen	Zeitraum
1. Sitzung des projektbegleitenden Ausschusses (PA)	Projektvorstellung, Aufnahme der Anforderungen und Ziele des PA	Virtuelles Meeting	30.06.2021
Erstellen einer Website mit Projektinformationen	Erzeugung von Aufmerksamkeit für das Projekt. Zentrale Informationsquelle für die genannten Themen außerhalb des Projektes	passform.biba.uni-bremen.de	Ab Projektbeginn. Letzter Beitrag: 01.09.2023
Information über das Projekt im Rahmen der Regel-Kommunikation des BIBA	Erzeugung von Aufmerksamkeit für das Projekt	BIBA-Newsletter LogDynamics-Newsletter	Oktober 2021

2. Sitzung des PA	Präsentation der Zwischenergebnisse, Vorstellung des Hardware-Prototyps, Diskussion des weiteren Vorgehens und der Transfermaßnahmen	Virtuelles Meeting	06.12.2021
Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses durch Abschlussarbeiten, Dissertationen sowie Lehrprojekten	Transfer der Ergebnisse und Inhalte. Unterstützung in der Umsetzung des Projektes	2 Bachelorarbeiten 10 Masterarbeiten	
3. Sitzung des PA	Präsentation der Zwischenergebnisse, Vorstellung des Softwareframeworks, Diskussion des weiteren Vorgehens und der Transfermaßnahmen	Virtuelles Meeting	10.08.2022
4. Sitzung des PA	Präsentation der Zwischenergebnisse, Vorstellung der aktuellen Software, Diskussion des weiteren Vorgehens und der Transfermaßnahmen	Virtuelles Meeting	13.12.2022
5. Sitzung des PA	Abschlusspräsentation, Vorstellung der entwickelten Software, Vorstellung des umgesetzten Demonstrators	Hybrides Meeting in der Forschungseinrichtung	31.05.2023
Fachvorträge in Verbandsgruppen mit industriellen Vertretern	Vorstellung der Zwischenergebnisse zum Ergebnistransfer der Systemarchitektur zur I4.0-Verwaltungsschale	ZVEI-FG Automation	01.06.2023
Weiterentwicklung der Forschungsinhalte im Rahmen eines Folgeprojektes	<ul style="list-style-type: none"> - Methoden zur automatischen Ableitung einer Prozessfolge aus Produkteigenschaften - Arbeitsraumüberwachung zur Verbesserung der Bahnplanung für engere MRK - Fahrerlose Transportfahrzeuge (FTFs) zur automatischen Anlieferung von Modulen 	Forschungsantrag AiF/IGF	26.06.2023
Wissenschaftliche Verwertung in Form von Publikationen in Fachzeitschriften sowie der Präsentation auf Messen u. Fachkonferenzen	Veröffentlichung der Anforderungen und des Konzeptes	Veröffentlichung eines Beitrages bei der ICME-Konferenz in Neapel und in der ISM Konferenz in Lissabon. Veröffentlichung in der Industrie 4.0 Management Journal: 38(2022)4	ICME: 22.-24.06.2022 ISM: 22.-24.11.2023 Journal: 38(2022)4

Schrittweise Weiterentwicklung u. Optimierung des Systems	Steigerung von Robustheit und Zuverlässigkeit	BIBA	Laufend Folgeprojekt „PassForM2“ beantragt am 01.09.2023
Erstellung und Verbreitung von Leitfäden zu modularen Montagesystemen für KMU	Vereinfachung der Einführung des Systems und Erweiterung des KMU-Nutzerkreises durch Methoden zur prozessabhängigen Analyse geeigneter Module (1) und zur wirtschaftlichen Bewertung der Einsatzfähigkeit modularer Montagesysteme (2)	BIBA, BIBA-Website, Mittelstand 4.0 Bremen, ZVEI-FG Automation	Dieses Dokument
Erstellung eines Abschlussberichts	Verbreitung der Projektergebnisse zur Kunden- und Partnerakquise für das System und / oder Folgeprojekte	BIBA	Dieses Dokument

7.2 Geplante Transfermaßnahmen

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
Wissenschaftliche Verwertung in Form von Publikationen in Fachzeitschriften sowie der Präsentation auf Messen u. Fachkonferenzen	Veröffentlichung der Ergebnisse zur Erweiterung des Stands der Wissenschaft. Förderung des wissenschaftlichen Austausches und Diskussion	Zeitschriften (z.B. Journal of Manufacturing Systems; Journal of Intelligent Manufacturing; International Journal of Production Research); Konferenzen (z.B. IFAC INCOM; CIRP CMS); Messen (z.B. Motek; HMI)	Fortlaufend
BIBA-Messe zum Thema „modulare, wandlungsfähige Montagesysteme“	Präsentation der Projektergebnisse und des RAMI 4.0-Prototyps im Umfeld von KMUs. Austausch mit potenziellen Kunden und Integratoren	BIBA mit Mittelstand 4.0 Bremen und ZVEI-FG Automation	-
Verbreitung eines Abschlussberichts	Verbreitung der Projektergebnisse zur Kunden- und Partnerakquise für das System und / oder Folgeprojekte	BIBA; Website der FE; tib Hannover	Veröffentlichung dieses Dokuments, spätestens 6 Monate nach Projektende.
Schrittweise Weiterentwicklung u. Optimierung des Systems	Anpassung an weitere industrielle Anforderungen verschiedener Branchen sowie Steigerung von Robustheit und Zuverlässigkeit	BIBA zusammen mit Interessenten	Direkt nach Projektende. Folgeprojekt „PassForM2“ beantragt am 01.09.2023

Vorstellung des optimierten Systems auf Messen	Kunden- und Partnerakquise für das System und / oder Folgeprojekte	Messen (z.B. Motek, Hannover Messe)	Ein Jahr nach Projektende
Analyse u. evtl. Umsetzung von Ausgründungsmöglichkeiten aus dem BIBA	Produktion und Markteinführung des Systems	BIBA	18 Monate nach Projektende

7.3 Einschätzung der Realisierbarkeit dieses Transferkonzepts

Das vorgestellte Transferkonzept ist allgemein als realistisch einzustufen. Die Vorlage dieses Schlussberichtes fasst die wichtigsten Ergebnisse des Projektes zusammen. Hierauf aufbauend sind weitere Veröffentlichungen sowohl in wissenschaftlichen Fachzeitschriften als auch in anwendungsnahen Publikationen und auf Messen möglich. Der Aufbau des Demonstrators erlaubt darüber hinaus die Projektergebnisse greifbar einem größeren Publikum vorzustellen. Gleichzeitig erlaubt der Aufbau eine direkte Weiterentwicklung des Systems innerhalb der Forschungseinrichtung. Unter anderem bildet das System die Basis für das Folgeprojekt „PassForM2“, welches auf den Erkenntnissen dieses Projektes aufbaut und bereits eingereicht wurde. „PassForM2“ setzt dabei direkt auf die entwickelten Schnittstellen und Standards auf und soll durch eine stärker modularisierte Software und die Weiterentwicklung der Prozessplanung die Skalierbarkeit des Systems weiter steigern.

Darüber hinaus werden die standardisierten Schnittstellen und bereits entwickelten Softwarebibliotheken derzeit auf ihre Übertragbarkeit in andere Forschungsanwendungen geprüft. Perspektivisch soll das PassForM-System die Grundlage für eine Vielzahl von Montageanwendungen und -entwicklungen darstellen und somit sowohl als modulares Montagesystem als auch Basis für individuelle Montagelösungen Anwendung finden.

Veröffentlichungen

Wilhelm, Jasper, Nils Hendrik Hoppe, und Michael Freitag. 2022. Konzept für ein modulares, rekonfigurierbares Montagesystem: Flexibilitätssteigerung durch Rekonfiguration auf verschiedenen Produktionsebenen. *Industrie 4.0 Management* 38 (4): 33–37.

Wilhelm, Jasper, Nils Hendrik Hoppe, und Michael Freitag. 2023. Requirements and concept development for a reconfigurable assembly system with individual and interchangeable modules. *Procedia CIRP* 118:964–969. doi: 10.1016/j.procir.2023.06.166.

Wilhelm, Jasper, Dario Niermann, Dennis Keiser, und Michael Freitag. 2023. Towards Holistic Interoperability of Cyber-Physical Production Systems within RAMI 4.0. In *Procedia Computer Science*, accepted. ISM 2023 International Conference on Industry 4.0 and Smart Manufacturing, Lisbon, Portugal. 22-24 November 2023.

8 Literaturangaben

- [1] ElMaraghy, H. u. ElMaraghy, W.: Smart Adaptable Assembly Systems. *Procedia CIRP* 44 (2016), S. 4–13
- [2] Koren, Y., Gu, X. u. Guo, W.: Reconfigurable manufacturing systems: Principles, design, and future trends. *Frontiers of Mechanical Engineering* 13 (2018) 2, S. 121–136
- [3] Scholz-Reiter, B. u. Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. *CIRP Annals* 56 (2007) 2, S. 712–729
- [4] Akillioglu, H. u. Onori, M.: Evolvable production systems and impacts on production planning. 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM). IEEE 2011, S. 1–6

- [5] Feldmann, K., Schöppner, V. u. Spur, G.: Montagezellen. In: Feldmann, K., Schöppner, V. u. Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. Hanser eLibrary. München: Hanser 2014, S. 433–588
- [6] Finsterbusch, T., Härtel, J., Wagner, T., Bützler, J., Faber, M., Bruder, R., Kuhlang, P. u. Schlick, C. M.: Modellierung und Gestaltung menschlicher Arbeit mit dem neuen MTM-Bau-Steinsystem Human Work Design. Verantwortung für die Arbeit der Zukunft. 61. GfA-Frühjahrskongress, 25. - 27.02.2015, Karlsruhe. Dortmund: GfA-Press 2015
- [7] Paul, R. P. u. Nof, S. Y.: Work methods measurement—a comparison between robot and human task performance. *International Journal of Production Research* 17 (1979) 3, S. 277–303
- [8] Golpîra, H.: Estimating Duration of Projects Manual Tasks Using MODAPTS plus Method. *International Journal of Research in Industrial Engineering* 2 (2013) 1, S. 12–19
- [9] Meier, O.: MODAPTS - „The Language of Work“. Ein System vorbestimmter Zeiten. In: Pieper, R. (Hrsg.): Vorträge des Sicherheitswissenschaftlichen Kolloquiums Sommersemester 2020. Wuppertal 2020
- [10] Genaidy, A. M. u. Gupta, T.: Robot and human performance evaluation. In: Karwowski, W. u. Rahimi, M. (Hrsg.): *Human-Robot Interaction*. London: CRC Press 1992
- [11] Zandin, K. B.: *MOST Work Measurement Systems*. Boca Raton, FL: CRC Press 2002
- [12] Wygant, R. M.: *Robots vs Humans in Performing Industrial Tasks. A Comparison of Motion Performance Times*, University of Houston Dissertation. Houston 1986
- [13] Funk, M., Kosch, T., Greenwald, S. W. u. Schmidt, A.: A benchmark for interactive augmented reality instructions for assembly tasks. *Proceedings of the 14th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia*. New York, NY, USA: ACM 2015, S. 253–257
- [14] Pimminger, S., Kurschl, W., Panholzer, L., Neumayr, T., Augstein, M., Altmann, J. u. Heinzlreiter, J.: Assembly Task Analysis Using the General Assembly Task Model (GATM) on the Shop Floor. *Procedia CIRP* 93 (2020), S. 1109–1114
- [15] Kluge, S.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2011 (Nicht für den Austausch). IPA-IAO Forschungs und Praxis, Bd. 510. Heimsheim: Jost-Jetter 2011
- [16] Schonberger, D., Lindorfer, R. u. Froschauer, R.: Modeling Workflows for Industrial Robots Considering Human-Robot-Collaboration. *2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. IEEE 2018, S. 400–405
- [17] Hengstebeck, A.: Modellierung interaktiver Mensch-Roboter-Prozesse zur Planung hybrider Arbeitssysteme, Shaker Verlag Dissertation 2020
- [18] VDI 2860:1990-05. *Montage- und Handhabungstechnik. Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole*
- [19] DIN 8593-0:2003-09. *Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0. Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
- [20] Prats, M., Sanz, P. J. u. Del Pobil, A. P.: A framework for compliant physical interaction. *Autonomous Robots* 28 (2010) 1, S. 89–111
- [21] Stolt, A.: On Robotic Assembly using Contact Force Control and Estimation, Lund Institute of Technology, Lund University PhD Thesis. Lund, Sweden 2015

- [22] Pane, Y., Arbo, M. H., Aertbelien, E. u. Decre, W.: A System Architecture for CAD-Based Robotic Assembly With Sensor-Based Skills. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* (2020), S. 1–13
- [23] Zhu, Z. u. Hu, H.: Robot Learning from Demonstration in Robotic Assembly: A Survey. *Robotics* 7 (2018) 2, S. 17
- [24] Huckaby, J. u. Christensen, H. I.: A Taxonomic Framework for Task Modeling and Knowledge Transfer in Manufacturing Robotic. *AAAI Workshops*. 2012, S. 94–101
- [25] Lamon, E., Franco, A. de, Peternel, L. u. Ajoudani, A.: A Capability-Aware Role Allocation Approach to Industrial Assembly Tasks. *IEEE Robotics and Automation Letters* 4 (2019) 4, S. 3378–3385
- [26] Mehrabi, M. G., Ulsoy, A. u. Koren, Y.: Reconfigurable manufacturing systems and their enabling technologies. *International Journal of Manufacturing Technology and Management* 1 (2000) 1, S. 114
- [27] Koren, Y., Heisel, U., Jovane, F., Moriwaki, T., Pritschow, G., Ulsoy, G. u. van Brussel, H.: Reconfigurable Manufacturing Systems. *CIRP Annals* 48 (1999) 2, S. 527–540
- [28] Koren, Y. u. Shpitalni, M.: Design of reconfigurable manufacturing systems. *Journal of Manufacturing Systems* 29 (2010) 4, S. 130–141
- [29] Khanna, K. u. Kumar, R.: Reconfigurable manufacturing system: a state-of-the-art review. *Benchmarking: An International Journal* 26 (2019) 8, S. 2608–2635
- [30] ElMaraghy, H. A. u. Wiendahl, H.-P.: Changeability – An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. Springer Series in Advanced Manufacturing. London: Springer London 2009, S. 3–24
- [31] Lotter, B. u. Wiendahl, H.-P.: Changeable and Reconfigurable Assembly Systems. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): *Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems*. Springer Series in Advanced Manufacturing. London: Springer London 2009, S. 127–142
- [32] Minhas, S. H., Lehmann, C., Städter, J. P. u. Berger, U.: Reconfigurable Strategies for Manufacturing Setups to Confront Mass Customization Challenges. 21st International Conference on Production Research (ICPR21). 2011
- [33] Huettemann, G., Gaffry, C. u. Schmitt, R. H.: Adaptation of Reconfigurable Manufacturing Systems for Industrial Assembly – Review of Flexibility Paradigms, Concepts, and Outlook. *Procedia CIRP* 52 (2016), S. 112–117
- [34] Trierweiler, M., Foith-Förster, P. u. Bauernhansl, T.: Changeability of Matrix Assembly Systems. *Procedia CIRP* 93 (2020), S. 1127–1132
- [35] Krüger, J., Wang, L., Verl, A., Bauernhansl, T., Carpanzano, E., Makris, S., Fleischer, J., Reinhart, G., Franke, J. u. Pellegrinelli, S.: Innovative control of assembly systems and lines. *CIRP Annals* 66 (2017) 2, S. 707–730
- [36] Hoang, X. L., Hildebrandt, C. u. Fay, A.: Beschreibung von Maschinenfähigkeiten – Ein produktorientiertes Beschreibungskonzept für Maschinenfähigkeiten in der Fertigungsindustrie. *Industrie 4.0 Management* 33 (2017) 6, S. 29–32
- [37] Wilhelm, J., Hoppe, N. H. u. Freitag, M.: Requirements and concept development for a reconfigurable assembly system with individual and interchangeable modules. *Procedia CIRP* 118 (2023), S. 964–969

- [38] Schlund, S., Mayrhofer, W. u. Rupprecht, P.: Möglichkeiten der Gestaltung individualisierbarer Montagearbeitsplätze vor dem Hintergrund aktueller technologischer Entwicklungen. *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 72 (2018) 4, S. 276–286
- [39] Rossi, F., Pini, F., Carlesimo, A., Dalpadulo, E., Blumetti, F., Gherardini, F. u. Leali, F.: Effective integration of Cobots and additive manufacturing for reconfigurable assembly solutions of biomedical products. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 14 (2020) 3, S. 1085–1089
- [40] Arai, T., Aiyama, Y., Maeda, Y., Sugi, M. u. Ota, J.: Agile Assembly System by “Plug and Produce”. *CIRP Annals* 49 (2000) 1, S. 1–4
- [41] Maeda, Y., Kikuchi, H., Izawa, H., Ogawa, H., Sugi, M. u. Arai, T.: “Plug & Produce” functions for an easily reconfigurable robotic assembly cell. *Assembly Automation* 27 (2007) 3, S. 253–260
- [42] Hankel, M.: Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0). Main: ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. 2015
- [43] Belyaev, A. u. Diedrich, C.: Aktive Verwaltungsschale von I4.0-Komponenten – Erscheinungsformen von Verwaltungsschalen. In: *Automation 2019. VDI-Berichte*, Bd. 2351. Düsseldorf: VDI Verlag 2019, S. 517–530
- [44] Wilhelm, J., Niermann, D., Keiser, D. u. Freitag, M.: Towards Holistic Interoperability of Cyber-Physical Production Systems within RAMI 4.0. *Procedia Computer Science*. 2023, accepted
- [45] Wilhelm, J., Hoppe, N. H. u. Freitag, M.: Konzept für ein modulares, rekonfigurierbares Montagesystem. Flexibilitätssteigerung durch Rekonfiguration auf verschiedenen Produktionsebenen. *Industrie 4.0 Management* 38 (2022) 4, S. 33–37
- [46] Profanter, S., Tekat, A., Dorofeev, K., Rickert, M. u. Knoll, A.: OPC UA versus ROS, DDS, and MQTT: Performance Evaluation of Industry 4.0 Protocols. *2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. IEEE 2019, S. 955–962
- [47] Aures, G.: DDS vs. MQTT vs. VSL for IoT. Seminar IITM SS 19. Network Architectures and Services, October 2019. 2019
- [48] Can ROS be used securely in industry? Red teaming ROS-Industrial, Mayoral-Vilches, V., Pinzger, M., Rass, S., Dieber, B. u. Gil-Uriarte, E., 2020
- [49] Cordis: Robotic Automation Modules for Production. Fact Sheet, 2020. <https://cordis.europa.eu/project/id/688642>, abgerufen am: 17.02.2022
- [50] Physical Interface Specification D3.1, Mikkelsen, A. u. Lyder, A. H., 2017
- [51] Edwards, S.: ROS-Industrial, 2014. <http://wiki.ros.org/Industrial>, abgerufen am: 21.02.2022
- [52] EP 2 362 408 A1
- [53] Details of the Asset Administration Shell. Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0, Plattform Industrie 4.0, Berlin 2022
- [54] Generic Frame for Technical Data for Industrial Equipment in Manufacturing, Plattform Industrie 4.0, Berlin 2020
- [55] ZVEI Digital Nameplate for industrial equipment, Plattform Industrie 4.0, Berlin 2020
- [56] Pfrommer, J., Schleipen, M. u. Beyerer, J.: PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource. *2013 IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)*. IEEE 2013, S. 1–4

- [57] Danny, P., Ferreira, P., Lohse, N. u. Dorofeev, K.: An Event-Based AutomationML Model for the Process Execution of Plug-and-Produce' Assembly Systems. 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). IEEE 2018, S. 49–54
- [58] Sugi, M., Maeda, Y., Aiyama, Y., Harada, T. u. Arai, T.: A holonic architecture for easy reconfiguration of robotic assembly systems. *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 19 (2003) 3, S. 457–464
- [59] Ginste, L. van de, Cock, A. de, Alboom, A. van, Singh, Y., Aghezzaf, E.-H. u. Cottyn, J.: A Formal Skill Model Facilitating the Design and Operation of Flexible Assembly Workstations. In: Dolgui, A., Bernard, A., Lemoine, D., Cieminski, G. von u. Romero, D. (Hrsg.): Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. IFIP Advances in Information and Communication Technology. Cham: Springer International Publishing 2021, S. 108–116
- [60] Heuss, L., Gonnermann, C. u. Reinhart, G.: An extendable framework for intelligent and easily configurable skills-based industrial robot applications. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 120 (2022) 9-10, S. 6269–6285
- [61] Perzylo, A., Grothoff, J., Lucio, L., Weser, M., Malakuti, S., Venet, P., Aravantinos, V. u. Deppe, T.: Capability-based semantic interoperability of manufacturing resources: A BaSys 4.0 perspective. *IFAC-PapersOnLine* 52 (2019) 13, S. 1590–1596
- [62] Silva, L. M. V. da, Köcher, A. u. Fay, A.: A capability and skill model for heterogeneous autonomous robots; [Ein Fähigkeits-und Skillmodell für heterogene autonome Roboter]. *At-Automatisierungstechnik* 71 (2023) 2, S. 140–150
- [63] Bomsdorf, B. u. Geiger, C.: Tasks as agents: prototyping task models. *Proceedings Sixth Australian Conference on Computer-Human Interaction*. 1996, S. 286–293
- [64] Lindorfer, R. u. Froschauer, R.: Towards user-oriented programming of skill-based Automation Systems using a domain-specific Meta-Modeling Approach. 2019 IEEE 17th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). IEEE 2019, S. 655–660
- [65] Lindorfer, R., Froschauer, R. u. Schwarz, G.: ADAPT - A decision-model-based Approach for Modeling Collaborative Assembly and Manufacturing Tasks. 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN). IEEE 2018, S. 559–564
- [66] Ginste, L. van de, Cock, A. de, Alboom, A. van, Huysentruyt, S., Aghezzaf, E.-H. u. Cottyn, J.: A formal skill model to enable reconfigurable assembly systems. *International Journal of Production Research* 61 (2023) 19, S. 6451–6466
- [67] Ribeaud, T. u. Sprenger, C. Z.: Behavior Trees based Flexible Task Planner Built on ROS2 Framework. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, ETFA 2022-September* (2022), S. 1–4
- [68] Sprenger, C. Z. u. Ribeaud, T.: Robotic Process Automation with Ontology-enabled Skill-based Robot Task Model and Notation (RTMN). 2022 2nd International Conference on Robotics, Automation and Artificial Intelligence, RAAI 2022 (2022)
- [69] Colledanchise, M. u. Ögren, P.: Behavior trees in robotics and AI. An introduction. Chapman & Hall/CRC artificial intelligence and robotics series. Boca Raton, London, New York: CRC Press 2019
- [70] Negri, E., Fumagalli, L. u. Macchi, M.: A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems. *Procedia Manufacturing* 11 (2017) June, S. 939–948

[71] Kitzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J. u. Sihn, W.: Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. IFAC-PapersOnLine 51 (2018) 11, S. 1016–1022