

Schlussbericht vom 31.03.2026

zum IGF-Vorhaben 22715 N

Thema

Situative Prozessautomatisierung durch interoperable Robotersysteme (SPrinterR)

Berichtszeitraum

01.04.2023 bis 30.09.2025

Forschungsvereinigung

Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V.

Theaterstraße 12

52062 Aachen

Forschungseinrichtung(en)

Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V.

Theaterstraße 12

52062 Aachen

Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen University

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Steinbachstraße 19

52074 Aachen

[[FVP]]

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung und Motivation.....	3
2	Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	8
2.1	Arbeitspaket 1: Anforderungsanalyse für die flexible Prozessautomatisierung	8
2.2	Arbeitspaket 2: Entwicklung einer Methodik für die Beschreibung der werkstattorientierten Fertigung	11
2.3	Arbeitspaket 3: Integration vorhandener IT-Systeme.....	12
2.4	Arbeitspaket 4: Bewertung der Automatisierbarkeit.....	13
2.5	Arbeitspaket 5: Erlernen von Fähigkeiten im Handhabungsprozess	14
2.6	Arbeitspaket 6: Erlernen von Fähigkeiten im Transportprozess.....	17
2.7	Arbeitspaket 7: Planung und Optimierung	19
2.8	Arbeitspaket 8: Aufbau eines Demonstrators.....	21
2.9	Arbeitspaket 9: Evaluation und Validierung.....	24
2.10	Arbeitspaket 10: Projektmanagement und Dissemination.....	26
3	Verwendung der Zuwendung	27
4	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	28
5	Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten	29
6	Wissenstransfer in die Wirtschaft.....	31
7	Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	33
7.1	Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende).....	33
7.2	Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)	35
8	Literaturverzeichnis	36
9	Forschungseinrichtungen	37

1 Einleitung und Motivation

Steigende Anforderungen an Produktvarianz und -qualität stellen KMUs vor immer größer werdende Herausforderungen. Parallel dazu führen stetige Innovationen zu immer kürzeren Produktlebenszyklen. An die Stelle evolutionärer Produktentwicklungen treten disruptive Produktänderungen, die die ständige Anpassung von Produktionsabläufen erfordern. Gleichzeitig gilt es, diese Abläufe möglichst kostengünstig und effizient zu gestalten, um weiterhin gegenüber dem internationalen Markt konkurrenzfähig zu sein.

Diesen Herausforderungen stehen steigende Energie-, Rohstoff und Lohnkosten und ein gravierender Fachkräftemangel gegenüber. Die Automatisierung von Prozessen ist daher zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit unabdingbar. Die hohe Variantenvielfalt, die kurzen Produktlebenszyklen sowie geringe Losgrößen führen jedoch dazu, dass in KMUs überwiegend manuell gearbeitet wird.

Die Automatisierung von repetitiven und monotonen sowie physisch belastenden Tätigkeiten bietet die Möglichkeit, die Werkenden zu entlasten, was im Hinblick auf ein höheres Durchschnittsalter der Arbeitnehmenden zunehmend an Relevanz gewinnt. Die Vorteile von Robotern hinsichtlich Wiederholgenauigkeit und Effizienz wirken sich positiv auf den Durchsatz und somit die Gesamteffizienz aus. Die Fertigung in KMUs ist in der Regel werkstatorientiert. Dies bedeutet, dass, im Gegensatz zur Linienfertigung, die Fertigung an einzelnen Stationen erfolgt, an welchen flexibel und produktspezifisch Prozessschritte durchgeführt werden.

Eine gesteigerte Autonomie des Gesamtsystems der werkstatorientierten Fertigung (WOF) senkt insgesamt die Abhängigkeit von personellen Ressourcen. Besonders in der Wertschöpfungskette von KMU mit spanender Bearbeitung liegt viel Potenzial in der flexiblen Automatisierung einzelner Prozessschritte. Die spanende Bearbeitung umfasst typischerweise einen Hauptprozess auf einer Werkzeugmaschine (WZM), bei dem das Halbzeug gedreht und/oder gefräst wird. Der Hauptprozess impliziert die Beladung sowie das Umspannen und anschließende Entnehmen des Werkstücks. Die notwendigen vorangehenden und nachgelagerten Hilfsprozesse sind sehr heterogen und daher teilweise schwierig zu automatisieren. Diese Prozesse umfassen Bearbeitungsschritte wie beispielsweise das Entgraten oder das Messen.

In den IGF-Forschungsprojekten FlexARob (IGF-Nr.: 19202N) und FlexARob² (IGF-Nr.: 20922 N) wurde am Werkzeugmaschinenlabor WZL der RWTH Aachen (WZL) zusammen mit der Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V. (FVP) bereits Konzepte und Methoden für die temporäre Automatisierung von WZM entwickelt. Aufgrund der anwenderfreundlichen Inbetriebnahme und der simulativen Absicherung der Abläufe sind weitere Anwendungsfälle in der Fertigung denkbar. Automatisierbare Prozessschritte sind potenziell räumlich über die Werkstatt verteilt. Da das System jedoch nicht in der Lage ist, sich eigenständig zu bewegen, kann das volle Potenzial nicht ausgeschöpft werden. Während der Bearbeitung auf der WZM steht der kollaborative Roboter (Cobot) still. Für ein KMU, dessen finanzielle Spielräume

begrenzt sind, muss sich die Investition eines Cobots lohnen. Daher ist das Ziel von Sprinter, durch den Einsatz von FTS und Cobot sowie eine übergeordnete Prozessmodellierung und -optimierung, den Automatisierungsgrad der Werkstatt zu steigern. Die Maximierung der Auslastung der Ressourcen ermöglicht eine schnellere Amortisation.

Zur Erreichung dieses Ziels wird das Vorhaben in drei Themenschwerpunkte gegliedert (vgl. Abbildung 1). Zunächst müssen Prozesse, Akteure und Ressourcen im Umfeld der Werkstatt modelliert werden. Auf Basis dieses Modells kann evaluiert werden, inwieweit einzelne Prozessschritte wirtschaftlich automatisiert werden können. Dies geschieht unter Einbeziehung des Prozesswissens der Werkenden. Durch die Kombination von Cobot und FTS soll die Autonomie und Flexibilität des Gesamtsystems gesteigert werden. Auf Basis der zuvor identifizierten Automatisierungspotenzialen werden dem System durch den Werkenden gezielt Handhabungs- und Transportprozesse erlernt.

Abschließend findet ein dynamisches Scheduling der eingesetzten Ressourcen zur Maximierung des Nutzens statt. Hierbei werden sowohl klassischen als auch KI-basierte Methoden zur Lösung des Optimierungsproblems betrachtet und evaluiert.

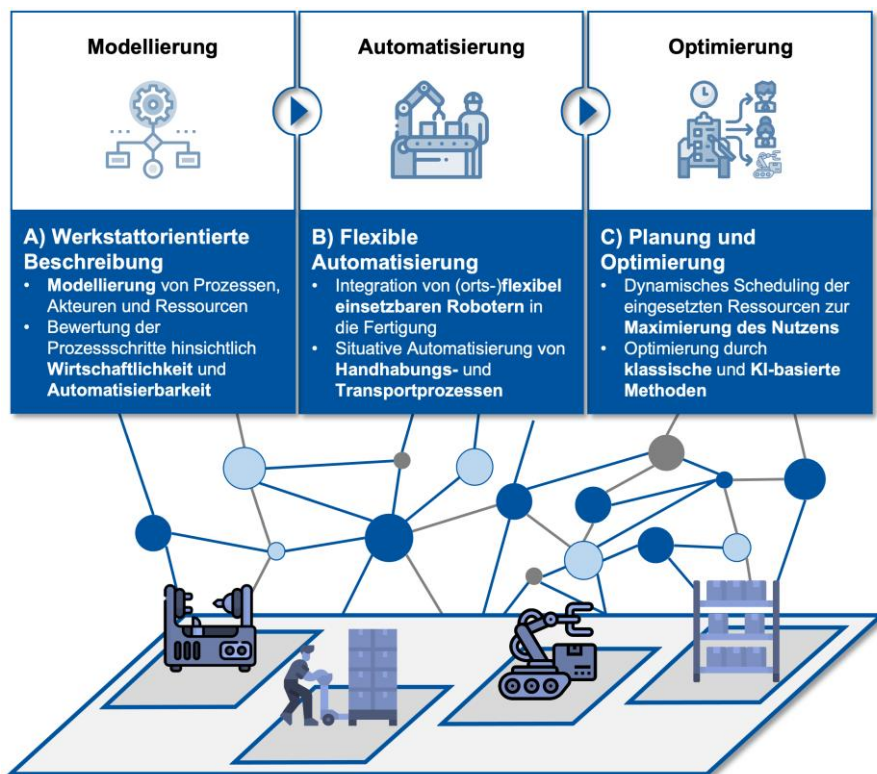


Abbildung 1: Konzeptskizze des Projektes SPrinter

Im Folgenden werden die zuvor beschriebenen Themenschwerpunkte im Detail erläutert:

A. Beschreibung der werkstatorientierten Fertigung

Die Integration von Robotern und FTS bedeutet eine Komplexitätssteigerung des Gesamtsystems der WOF. Um Potenziale hinsichtlich der Automatisierbarkeit erkennen zu können, müssen Randbedingungen und Abhängigkeiten in einem Modell abgebildet werden. Ausgehend von der Produktpalette des Unternehmens müssen die erforderlichen Prozessschritte für die Produktion identifiziert werden. Dabei kann auf ERPSysteme zurückgegriffen werden. Damit sind die erforderlichen Prozessschritte auf einem hohen Abstraktionslevel abgebildet. Eine detaillierte Modellierung ist unter Einbeziehung von CAD-/CAM-/NC-Daten aus der Arbeitsvorbereitung möglich. Die kleinschrittigste Prozessbeschreibung ist durch die Konsultation der Werkenden möglich. Ihr Prozesswissen ist wertvoll, um beurteilen zu können, inwiefern die Prozessschritte, die aktuell manuell durchgeführt werden, teilweise oder ganz automatisiert werden können. Gleichzeitig wird durch die zusätzliche Dokumentation ein Wissenstransfer ermöglicht. Beides sind wichtige Argumente, um dem Fachkräftemangel zu begegnen.

Generell wird die Modellierung technologieoffen und herstellernerneutral erfolgen. Für die Modellierung von Prozessen und Ressourcen bieten sich Verwaltungsschalen an, für die Modellierung von Abhängigkeiten Ontologien, da sie die Beschreibung von Zusammenhängen und das automatisierte logische Schlussfolgern ermöglichen. Produktionsprozesse werden dabei nicht als starre Abfolge von Handlungsoperationen definiert, sondern als Transition von einem Ausgangs- in einen Zielzustand. Die Beziehungen zwischen den Zustandsänderungen implizieren die jeweiligen Prozessschritte inklusive der erforderlichen Ressourcen. So können Potentiale für (Teil-)Automatisierung von Prozessschritten erkannt werden. Ontologien bieten zudem die Möglichkeit zur flexiblen Erweiterung, was hinsichtlich von zahlreichen Produktvarianten sowie kürzeren Produktlebenszyklen vorteilhaft ist. Neu erworbene Maschinen und Anlagen lassen sich nahtlos in das bestehende Modell eingliedern. So kann das Modell kontinuierlich weiterentwickelt und angepasst werden.

B. Flexible Automatisierung von Produktionsprozessen

Bei KMU handelt es sich im Allgemeinen um Brownfield-Umgebungen, deren Maschinen und Anlagen häufig nicht über die nötigen Schnittstellen verfügen, die für eine reibungslose Automatisierung erforderlich sind. Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen des Vorgängerprojektes FlexARob2 ein Cobot für die temporäre Automatisierung von WZM eingesetzt. Um seinen Einsatz weiter zu flexibilisieren, wird dieser Roboter durch die Kombination mit einem FTS zu einem autonomen mobilen Roboter (AMR). Dieser kann so innerhalb der WOF selbstständig zwischen den einzelnen Stationen wechseln und ermöglicht somit die Automatisierung der werkstatorientierten Fertigung. Der Einsatz eines AMR maximiert die Auslastung des Cobots und beschleunigt zudem Prozessabläufe durch die Parallelisierung von Bearbeitungs- und Beladungsvorgängen.

Um auch das FTS während der operativen Zeit des Cobots optimal auszulasten, werden auch für dieses Szenario Lösungen entwickelt. Hier kann das FTS beispielsweise für Transportaufgaben genutzt werden. In einem weiteren Szenario fungiert der AMR bestehend aus Cobot und FTS als Einheit und führt Aufgaben in Kollaboration aus. Verglichen mit dem Vorgängerprojekt ergeben sich somit neue Einsatzmöglichkeiten. Diese gilt es, aufbauend auf dem entwickelten Modell der WOF, zu identifizieren und umzusetzen.

Durch die Vorgängerprojekte verfügt der Cobot bereits über die Fähigkeit, eine WZM zu beschicken. Dies stellt eine spezielle Handhabungsaufgabe dar. Jedoch ergeben sich in der spannenden Bearbeitung eine Vielzahl vergleichbarer Tätigkeiten, wie z. B.: das Beladen einer Messmaschine, einer Entgratstation oder eines Werkstückspeichers. Aufbauend auf dem vorhandenen Wissen, soll die Fähigkeit des Beladens generalisiert werden, um den Cobot noch flexibler einsetzen zu können. Dazu müssen auf der einen Seite sowohl Cobot als auch FTS diese Fähigkeiten erlernen, auf der anderen Seite müssen die vorhandenen Ressourcen innerhalb der WOF so präpariert sein, dass sie mit den eingebrachten Automatisierungskomponenten interagieren können.

C. Planung und Optimierung des Produktionsprozesses

Nach Umsetzung der Forschungsschwerpunkte A und B, können Fertigungsprozesse werkstatorientiert beschrieben werden und Cobot und FTS (bzw. die Kombination beider als AMR) sind in der Lage, die Werkenden bei der Ausführung dieser Prozesse zu unterstützen oder gar zu ersetzen. Um den nutzenmaximalen Einsatz sicherzustellen, ist eine übergeordnete Prozessplanung und -optimierung erforderlich. Das semantische Modell bietet die Grundlage, diese Planung durch den Einsatz von Optimierungsalgorithmen zu automatisieren, sodass an dieser Stelle personelle Ressourcen gespart werden können. Die Randbedingungen des aufgestellten Optimierungsproblems ändern sich dabei typischerweise durch externe Faktoren, wie Auftragsänderungen oder Lieferengpässe, aber auch durch interne Faktoren wie Mitarbeiterausfälle. Je nach Anzahl und Komplexität der zu fertigenden Produkte und vorhandenen Ressourcen ist das Optimierungsmodell zudem beliebig komplex. Es ist zu untersuchen, inwieweit klassische Optimierungsverfahren in einer angemessenen Zeit eine zufriedenstellende Lösung finden. Als Alternative eignen sich potenziell auch Algorithmen des Maschinellen Lernens, wobei hier besonders das Reinforcement Learning zu nennen ist. Das Ziel ist die Optimierung hinsichtlich der zuvor definierten Kriterien, wobei der wirtschaftliche Nutzen im Vordergrund steht. Durch Konsultation der Werkenden ist auch die Evaluation der Prozessschritte hinsichtlich ergonomischer Kriterien möglich. Die genaue Modellierung der WOF bietet perspektivisch zudem die Möglichkeit, die Optimierung hinsichtlich einer Minimierung des Energieverbrauchs auszurichten, um steigenden Nachhaltigkeitsanforderungen gerecht zu werden.

Die Optimierung sollte möglichst automatisiert erfolgen, sodass nach Initialisierung durch einen Experten die Anwendung sowie die Anpassung bei Erweiterungen des Produktkatalogs oder der verfügbaren

Ressourcen Personen ohne Fachwissen im Bereich der Optimierung möglich ist. Ergebnis ist somit ein dynamisches Scheduling der Prozessschritte, dass den nutzenmaximierenden Einsatz der Produktionsressourcen ermöglicht.

Vor diesem Hintergrund soll das Projekt SprinteR die Möglichkeit einer situativen Prozessautomatisierung bieten. Der Einsatz eines FTS verleiht dem Gesamtsystem zusätzliche Freiheitsgrade, da es den autonomen Transport von Produktionsressourcen ermöglicht. Auf diese Weise werden Stillstandzeiten minimiert, indem der Cobot beispielsweise zwei Maschinen parallel belädt. Während insgesamt die Abhängigkeit von der Komponente Mensch weiter reduziert wird, wird jedoch die Komplexität des Gesamtsystems gesteigert. Um zu gewährleisten, dass der Einsatz aller Ressourcen möglichst nutzenmaximierend erfolgt, ist ein übergeordnetes Scheduling notwendig. Aus dieser Motivation lässt sich folgende Hauptforschungsfrage ableiten:

Inwiefern kann die Steigerung des Automatisierungsgrades der werkstatorientierten Fertigung durch ein FTS und die Kombination einer semantischen Prozessmodellierung mit einer Prozessoptimierung zu einer Nutzenmaximierung führen?

Zunächst ist die Entwicklung einer Methodik für die werkstatorientierte Beschreibung der Fertigung erforderlich. Ausgehend von den zu fertigenden Produkten müssen die erforderlichen Prozessschritte identifiziert und modelliert werden. Dem gegenüber stehen die verfügbaren Ressourcen, wie Betriebsmittel, personelle Ressourcen, Rohmaterialien, Halbzeuge etc., die für diese Prozessschritte erforderlich sind. Die semantische Modellierung ermöglicht eine strukturierte Beschreibung, sodass eine Zuordnung zwischen erforderlichen Prozessschritten vorbereitet wird. Durch Anreicherung mit bestehenden Informationen aus IT-Systemen des Unternehmens, wie beispielsweise Arbeitsplänen oder Inventarlisten, CAD/CAM/NC-Daten sowie Expertenwissen der Werkenden erfolgt eine holistische Werkstattbeschreibung. Auf Basis dieser Werkstattbeschreibung können dann Bewertungen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Machbarkeit der Automatisierung von einzelnen Prozessschritten erfolgen. Darauf aufbauend wird die Möglichkeit des Erlernens von Fähigkeiten des FTS, des Cobots und der Kombination zum AMR untersucht. Im Fokus stehen dabei sowohl Handhabungs- als auch Transportprozesse. Dementsprechend soll das System sukzessive neue Fähigkeiten erlernen und so die Werkenden von repetitiven oder körperlich anstrengenden Tätigkeiten entlasten.

Nach dem Training findet eine Optimierung statt, wobei sowohl Scheduling-Algorithmen als auch KI-basierte Algorithmen genutzt und evaluiert werden. Das Scheduling soll den Endanwender dazu befähigen, auch bei kurzfristigen Personalengpässen schnell und effizient reagieren zu können, indem z. B. bestimmte, erlernte Tätigkeiten auf das AMR übertragen werden können. Zum Ende des Vorhabens soll ein Demonstrator aufgebaut sein, um die entwickelten Konzepte und Methoden direkt am WZL und bei den Anwenderunternehmen des PA erproben und validieren zu können.

2 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

Zur Validierung der Arbeitshypothese wurden insgesamt 10 Arbeitspakete definiert:

- AP 1: Anforderungsanalyse für die flexible Prozessautomatisierung (WZL)
- AP 2: Entwicklung einer Methodik für die Beschreibung der werkstatorientierten Fertigung (FVP)
- AP 3: Integration vorhandener IT-Systeme (FVP)
- AP 4: Bewertung der Automatisierbarkeit (WZL)
- AP 5: Erlernen von Fähigkeiten im Handhabungsprozess (WZL)
- AP 6: Erlernen von Fähigkeiten im Transportprozess (WZL)
- AP 7: Planung und Optimierung (FVP)
- AP 8: Aufbau eines Demonstrators (WZL)
- AP 9: Evaluation und Validierung (FVP)
- AP 10: Projektmanagement und Dissemination (FVP, WZL)

Im Folgenden werden die im Projekt bearbeiteten Arbeitspakete und die darin durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse beschrieben. Für jedes Arbeitspaket werden Zielsetzung, Vorgehen und die wesentlichen Ergebnisse inklusive der erzielten Demonstratoren bzw. Validierungen dargestellt.

2.1 Arbeitspaket 1: Anforderungsanalyse für die flexible Prozessautomatisierung

Im Rahmen von AP1 sollten die Anforderungen und Rahmenbedingungen für eine flexible Prozessautomatisierung in werkstatorientierten Fertigungsumgebungen ermittelt werden. Dabei waren sowohl funktionale als auch nicht-funktionale Anforderungen zu formulieren und gemeinsam mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA) konkrete Anwendungsfälle abzuleiten, die als Leitplanken für die nachfolgenden Arbeitspakete dienen. Die Anforderungsanalyse erfolgte als Kombination aus (i) Beobachtung typischer Materialfluss- und Handhabungsprozesse in KMU-Umgebungen, (ii) strukturierten Interviews mit Werkenden und Verantwortlichen aus Produktion/Logistik sowie (iii) Ableitung von Systemanforderungen aus dem Zielbild einer niederschweligen, werkstattnahen Inbetriebnahme mobiler Manipulatoren. Zusätzlich wurden Erfahrungen aus Vorgängerarbeiten und der vorhandenen Demonstrator-Umgebung am WZL herangezogen, um Anforderungen frühzeitig auf Realisierbarkeit und Integrationsaufwand abzugleichen.



Abbildung 2: Prozessschritte für die Herstellung eines Drehteils bei THH Drehteile

Im Rahmen von (i) wurden verschiedene Produktionsumgebungen des projektbegleitenden Ausschusses (PA) besichtigt, von denen ein Produktionsprozess in Abbildung 2 zu sehen ist. Im Anschluss an die Besichtigung wurden im Rahmen von (ii) Interviews geführt, die Fragen zur IT-Infrastruktur, zur Einbindung von ERP/MES-Systemen und zu Handhabungs- und Logistikaufgaben beinhalteten. Aus den Besichtigungen und Interviews wurden die Anforderungen (iii) abgeleitet. Dazu wurden die funktionalen Anforderungen definiert:

1. Formale Beschreibung des Produktionsprozesses und des Produkts über eine GUI
2. Transport von Europaletten und Behältern zwischen Lager und Produktionsmaschinen auf freien Routen
3. Autonomes Umfahren von Hindernissen und Funktionsfähigkeit auch nach Layoutänderungen
4. Aufnahme der Europaletten und Behälter auch bei Ungenauigkeiten
5. Auffinden Werkzeugmaschinen auch bei einer Veränderung der Position
6. Sensorsystem zur Objekterkennung und Posenbestimmung kann auf die Erkennung neuer Objekte angepasst werden
7. Greifen diverser industrieller Bauteile
8. Unabhängigkeit der Software von der verwendeten Hardware

Über diese funktionalen Anforderungen hinaus wurden die nicht-funktionalen Anforderungen definiert:

9. Das Automatisierungssystem soll so ausgelegt sein, dass es bei veränderten Prozessen um zusätzliche Funktionen ergänzt werden kann. Dies betrifft sowohl die Einbindung neuer Hardwarekomponenten als auch die Erweiterung der Software.

10. Die bereitgestellten Funktionen sollen so gestaltet sein, dass sie sich für unterschiedliche Abläufe variabel kombinieren und bei Bedarf auch einzeln ausführen lassen. Dadurch sollen verschiedenartige Prozessketten abgebildet werden können.
11. Die Funktionen sollen über anpassbare Parameter verfügen, damit sie ohne vertiefte Programmierkenntnisse auf unterschiedliche Prozessschritte zugeschnitten werden können.
12. Einmal entwickelte Funktionen sollen in unterschiedlichen Anwendungskontexten erneut einsetzbar sein, um den Implementierungsaufwand für Werkende möglichst gering zu halten.

Nicht betrachtete bzw. nur randständig betrachtete Aspekte: Sicherheitsaspekte bei der Steuerung des AMR wurden nicht als Forschungsgegenstand vertieft, können jedoch durch Nutzung integrierter Sicherheitsfunktionen (z. B. Safety-Lidar, Schutzfeldkonzepte) und eine spätere Zertifizierung in Kombination mit kollaborativen Robotern ergänzt werden.

Eine zentrale Leitsteuerung mehrerer AMR wurde nicht fokussiert, da entsprechende Infrastrukturen in KMU typischerweise selten vorhanden sind. Für den AMR wurde überwiegend ebener Boden angenommen, wobei leichte Unebenheiten toleriert werden müssen. Betrachtet wurden Logistikprozesse vom Lager in die Maschinenhalle, bei denen Transportboxen bzw. Güter maximal um ca. 0,2 m anzuheben sind; Umschichtprozesse über mehrere Ebenen (z. B. Stapler/Hochhubwagen) wurden aufgrund der AMR-Bauform ausgeklammert.

Als Ergebnis liegt ein konsolidierter, anwendungsnaher Anforderungskatalog mit klaren Betrachtungsgrenzen, Umweltannahmen und Zielkriterien vor. Dieser diente als Grundlage für die Auslegung der Modellierungs- und Integrationsansätze (AP2/3), die Ableitung von zu erlernenden Fähigkeiten über Use-Cases (AP4–6) sowie für die Gestaltung eines skill-basierten, durch Werkende parametrierbaren Programmier- und Ausführungsframeworks (AP5–8). Gemeinsam mit dem PA wurden die in der Werkstatt am häufigsten vorkommenden, zugleich aber besonders zeitintensiven Unterstützungsbedarfe identifiziert. Im Vordergrund standen wiederkehrende Materialtransporte zwischen Lager und Maschinen sowie einfache Handhabungsschritte an klar definierten Übergabepunkten.

2.2 Arbeitspaket 2: Entwicklung einer Methodik für die Beschreibung der werkstatorientierten Fertigung

Gemäß Antrag zielte dieses Arbeitspaket darauf ab, eine Methodik zu entwickeln, mit der werkstatorientierte Fertigungen (WOF) für KMU als digitales Abbild beschrieben werden können. In vielen KMU liegt Wissen über Prozessdurchführung, Ressourcenverfügbarkeit und erforderliche Fähigkeiten implizit bei den Werkenden vor. Für eine systematische Automatisierungsbewertung und eine spätere Zuordnung von Aufgaben auf Mensch, Industrieroboter und FTS/AMR ist jedoch eine explizite, maschinenlesbare Beschreibung erforderlich. Daher wurde ein mehrstufiger Modellierungsansatz erarbeitet, der (i) eine verständliche, visuelle Prozesssicht für Werkende bereitstellt und (ii) zugleich eine strukturierte technische Repräsentation ermöglicht, die für die automatisierte Planung und Ausführung geeignet ist. Als konzeptionelle Basis wurde das PPR-Denkmodell genutzt: Produkte (Material/Teil), Prozesse (Bearbeitungsschritte) und Ressourcen (Maschinen, Menschen, Roboter, Transportmittel sowie Software-Services). Dadurch können Prozessanforderungen (z. B. „Teil muss zur Maschine X“) sauber von der konkreten Ausführung (wer/was übernimmt den Schritt) getrennt werden. Diese Trennung ist Voraussetzung für spätere Wandlungsfähigkeit, da Änderungen im Layout oder Ressourcenbestand nicht zwangsläufig eine vollständige Neumodellierung erfordern.

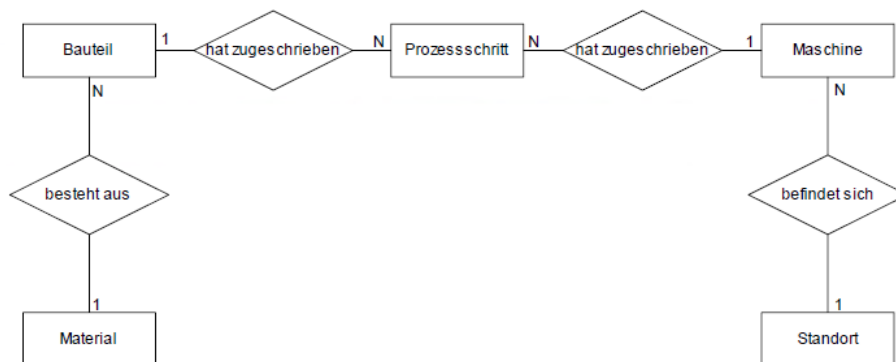


Abbildung 3: Entitäten und Relationen zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen

Für die Darstellung von Auftrags- und Prozessketten wurde Business Process Model and Notation (BPMN) als geeignete, etablierte Notation identifiziert. BPMN erlaubt eine gut lesbare Abbildung von Prozessschritten und deren Reihenfolge und kann dadurch als Brücke zwischen Werkstattwissen und technischer Systemrepräsentation dienen. Im Projekt wurde ein Regelwerk erarbeitet, wie lineare Prozessketten aus Fertigungsdaten in BPMN-Aufgaben, Ereignisse und Sequenzflüsse überführt werden können. Um Prozessschritte mit relevanten Kontextinformationen zu versehen (z. B. Maschinename, Hersteller, Hallen-/Bereichsinformationen, Materialbezeichnung), wurden Textannotationen als leichtgewichtiges Erweiterungskonzept genutzt. Die Inhalte der Textannotationen wurden als Schlüssel-Wert-Struktur in YAML organisiert, um Menschenlesbarkeit, Konsistenz und eine spätere automatische Weiterverarbeitung zu gewährleisten. Dadurch bleibt das Prozessdiagramm übersichtlich, während technische Parameter strukturiert verfügbar sind.

Im Zentrum der Beschreibung der werkstatorientierten Fertigung steht die Beschreibung der Prozesse. Durch die BPMN Struktur werden aber alle Relationen zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen beschrieben (siehe Abbildung 3). Aufgrund des hohen Modellierungsaufwands wurde von der im Antrag beschriebenen Modellierung von Produkt, Prozess und Ressourcen durch Verwaltungsschalen abgewichen.

2.3 Arbeitspaket 3: Integration vorhandener IT-Systeme

Da in Unternehmen viele Daten in ERP und MES Systemen vorliegen, sollen diese automatisiert ausgelesen und in das in AP2 erarbeitete BPMN Format überführt werden. Damit sollten Akzeptanz und Einstiegshürden reduziert werden, indem vorhandene Daten genutzt werden, statt die Werkstattbeschreibung vollständig manuell zu erstellen. Gleichzeitig war eine Schnittstelle vorgesehen, über die implizites Wissen der Werkenden ergänzt werden kann.

Zu Beginn wurden verbreitete Integrationswege identifiziert und hinsichtlich Aufwand/Übertragbarkeit bewertet. In der Praxis reichen diese von direkten Datenbankzugriffen über proprietäre REST-APIs, standardisierte REST-Varianten (z. B. OData), SOAP-basierte Dienste bis hin zu Datei-Exporten. Für das Projekt wurde ein Adapterkonzept abgeleitet, das eine Entkopplung zwischen Datenquelle und nachgelagerter Prozessmodellierung ermöglicht und damit den im Antrag geforderten serviceorientierten Ansatz unterstützt.

Da nicht alle in ERP-Systemen geführten Prozessschritte für eine AMR-/Manipulator-Unterstützung gleichermaßen relevant sind, wurde ein Filterkonzept implementiert: Prozessschritte mit direktem Bezug zu einer realen Werkzeugmaschine (z. B. Bearbeitungsschritt) werden als Kandidaten für robotische Unterstützung gekennzeichnet, während vorbereitende Schritte (z. B. Programmierung, Bauteilvorbereitung) zwar zur Vollständigkeit im Prozessdiagramm enthalten sein können, aber nicht automatisch in ausführbare Robotikabläufe übersetzt werden. Auf Basis der extrahierten Fertigungsdaten wurde eine automatisierte Erzeugung von BPMN-Diagrammen umgesetzt. Die lineare Abfolge der Prozessschritte wurde in Aufgaben und Sequenzflüsse überführt; Start- und Endereignisse rahmen den Auftrag. Zusatzinformationen (z. B. Maschinenname, Hersteller, Hallenadresse, Material) werden strukturiert als Textannotation in YAML an die jeweiligen Aufgaben angebunden. Dieser Schritt liefert eine verständliche Visualisierung für Werkende.

Für KMU-typische Lücken (z. B. exakte Maschinenpositionen, Lagerplätze, temporäre Stellflächen) wurde festgehalten, dass Ergänzungen durch Werkende erforderlich sind, die direkt über eine GUI im BPMN-Diagramm ergänzt werden können.

2.4 Arbeitspaket 4: Bewertung der Automatisierbarkeit

Es wurde ein diskretes bzw. ereignisgetriebenes Simulationsmodell entwickelt, das den Zugriff auf Modell- und Bewertungsergebnisse ermöglicht. Es wurden automatisierbare Prozessschritte identifiziert und die zu erlernenden Fähigkeiten der beteiligten Akteure abgeleitet.

Zur Abbildung der werkstatorientierten Fertigung wurde ein ereignisgetriebener Ansatz gewählt, der Aufträge als Entitäten und Prozessschritte als Ereignisketten modelliert. Ressourcen (Werkende, Werkzeugmaschinen, Industrieroboter, AMR/FTS) werden über Verfügbarkeiten, Kapazitäten und Rüst-/Bearbeitungszeiten beschrieben. Für Transport- und Handhabungsaktionen werden zusätzlich Such-/Navigationszeiten, Greif-/Platzierzeiten und Interaktionszeiten (z. B. Übergabe) berücksichtigt. Das Modell ist damit geeignet, Durchlaufzeiten, Ressourcenauslastungen und Engpässe in unterschiedlichen Automatisierungsgraden zu vergleichen. Im Rahmen des Projekts wurde die Bewertungsmethodik genutzt, um typische Kandidatenaktionen zu identifizieren: (i) innerbetrieblicher Transport von Rohmaterialien und Werkstückträgern zwischen Lager und Maschinen, (ii) positionsvariantes Auffinden von Zielstationen und Transporthilfsmitteln, (iii) wiederkehrende Pick-and-Place-Handhabungsschritte (z. B. Werkstück aufnehmen/absetzen) und (iv) teilautomatisiertes Maschinenbe- und -entladen in definierten Schnittstellenbereichen. Für jede Kandidatenaktion wurden die benötigten Fähigkeiten auf Sensorik-, Planungs- und Ausführungsebene abgeleitet.

Um die Auslastung der Werkenden und die Durchlaufzeiten der einzelnen Prozessschritte zu bewerten, wurde ein Simulationsmodell in Simulink entwickelt, Abbildung 4. Damit konnten verschiedene Szenarien getestet werden, um die beste Kombination von Werkenden und Automatisierungssystem für die Durchführung des Prozesses zu finden. Komplexe Tätigkeiten, die viel Erfahrung von Werkenden voraussetzen als auch Tätigkeiten, die eine hohe Feinfühligkeit voraussetzen wurden für die Automatisierung ausgeschlossen.

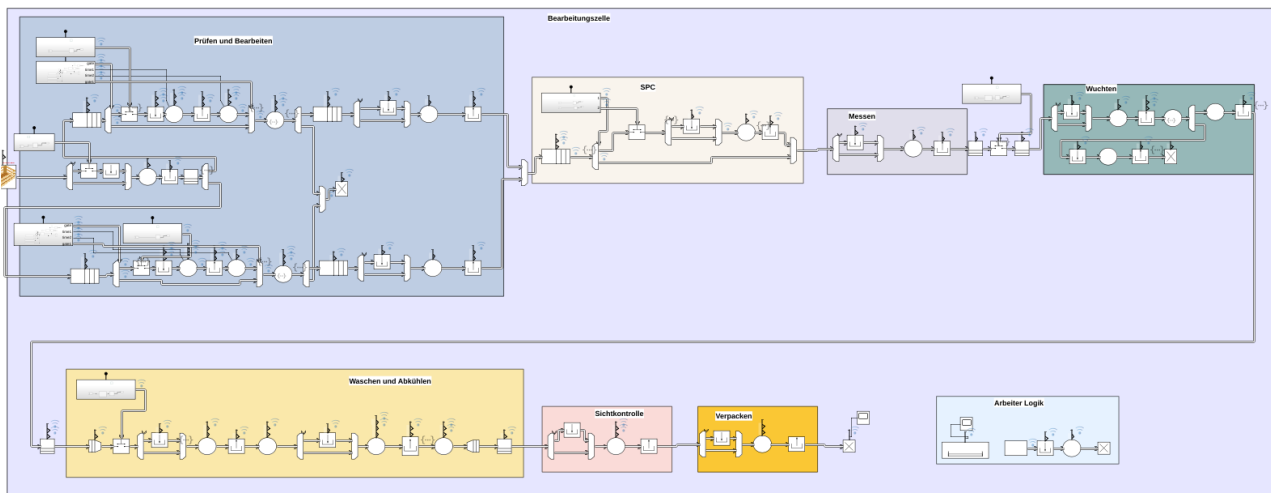


Abbildung 4: Beispielhaftes Simulationsmodell Produktionsprozess

Diese Kopplung ist wesentlich, um die im Antrag geforderte Nutzung bereits vorhandener Datenquellen (AP3) für nachgelagerte Analysen zu realisieren. Fähigkeiten und Skill-Bibliothek als Zielbild: Als Ergebnis wurde ein Katalog zu erlernender Fähigkeiten formuliert, der die Grundlage für AP5 und AP6 bildet. Wesentliche Fähigkeitsgruppen sind: Objekt-/Stationsidentifikation, robuste Pose-Schätzung und Kontextwahrnehmung für dynamische Werkstattumgebungen, kollisionsfreie Annäherung, Greifen, Halten/Transportieren im Greifer, präzises Platzieren/Fügen, sichere Navigation, Umplanung bei Hindernissen, Andocken/Positionieren an Übergabepunkten sowie Handhabung einfacher Hubvorgänge im betrachteten Höhenbereich.

AP4 bildet die methodische Brücke zwischen Anforderungsdefinition und technischer Umsetzung. Durch die systematische Bewertung und die daraus abgeleitete Fähigkeitsliste wurden Entwicklungsaufwände in AP5/6 zielgerichtet fokussiert und zugleich die Grundlage für spätere Planung/Optimierung (AP7) und Demonstrationsszenarien (AP8/9) gelegt. Aus der Szenarioanalyse wurden Prioritäten für die technische Umsetzung abgeleitet. Vorrangig sind Skills, die (i) häufig auftreten, (ii) geringe Eingriffe in bestehende Prozesse erfordern und (iii) trotz Umfeldvariabilität robust lösbar sind. Daraus ergaben sich als Schwerpunkt: Navigation/Transport zwischen festen Bereichen, Objekt- und Stationslokalisierung sowie Pick-and-Place-Handhabung mit begrenzten Toleranzen. Komplexere Tätigkeiten mit hohem Rüst- oder Variationsanteil wurden als mittelfristige Ausbaustufe klassifiziert.

2.5 Arbeitspaket 5: Erlernen von Fähigkeiten im Handhabungsprozess

In diesem Arbeitspaket sollten Fähigkeiten im Handhabungsprozess entwickelt bzw. erlernt werden, also alle Aktionen, bei denen ein Objekt aufgenommen und an anderer Stelle abgelegt oder in eine Zielgeometrie eingefügt wird. Dies umfasst einfache Pick-and-Place-Vorgänge ebenso wie komplexere Abläufe in der Maschinenbeschickung. Ziel war es, konfigurierbare, wiederverwendbare Skills zu entwickeln, die auch unter Lageunsicherheiten und Variantenvielfalt robust ausführbar sind. Aufbauend auf den Anforderungen aus AP1 wurde ein fähigkeitsbasierter Ansatz konzipiert, der Robotikfunktionen in (i) Primitives (hardware-/sensor-nah), (ii) Fähigkeiten/Skills (wiederverwendbare Funktionsbausteine) und (iii) Services/Planungsbausteine (z. B. Trajektorienplanung, Fehlerbehandlung) gliedert. Diese Ebenen werden über eine übergeordnete Ablaufsteuerung in Form von Behavior Trees orchestriert. Damit lassen sich modulare Skills wie „Lokalisieren“, „Greifen“ und „Platzieren“ flexibel kombinieren und situationsabhängig ausführen. Behavior Trees ermöglichen eine klare, hierarchische Strukturierung von Aufgaben sowie definierte Reaktionen auf Fehlerfälle (Fallback, Recovery). Im Projekt wurde eine BT-Struktur für Pick-and-Place-Aufgaben ausgearbeitet, die u. a. (i) die Aktivierung eines Auftrags, (ii) das Laden und Speichern von Parametern auf einem Blackboard, (iii) die Ausführung der Handhabungssequenz und (iv) einen Assistenzzweig umfasst, der bei nicht auflösbaren Situationen eine Unterstützung durch Fachpersonal anfordert (siehe Abbildung). Dadurch wird der im Antrag adressierte Bedarf an robusten, in der Werkstatt einsetzbaren Abläufen unterstützt. Zur niederschweligen

Nutzung wurden die zentralen Parameter der Handhabungsaufgabe über eine GUI erfassbar gemacht. Dazu zählen insbesondere (i) die Erfassungspose des Roboters für eine Bildaufnahme, (ii) die Ablage-/Zielpose sowie (iii) die Bezeichnung des zu greifenden Objekts. Die Parametrierung ist bewusst so gestaltet, dass Werkende keine Programmierkenntnisse benötigen und dass Skills in unterschiedlichen Kontexten wiederverwendbar bleiben. Für robuste Handhabung in variantenreichen Umgebungen ist eine präzise Wahrnehmung erforderlich. Im Projekt wurde die KI-basierte 6D-Posenschätzung als sensorbasierte Fähigkeit in das Skill-System integriert. Ein zentrales Ergebnis ist die Möglichkeit, neue Objekte ohne zusätzliches Training einzubinden, indem CAD-Modelle genutzt werden (z. B. über FoundationPose). Damit kann die Objektintegration deutlich beschleunigt werden, was insbesondere für KMU mit häufig wechselnden Teilen relevant ist. Auf Basis der erkannten Objektpose werden Greif- und Annäherungspunkte berechnet und kollisionsfreie Bewegungen geplant. Für das Platzieren bzw. Fügen (z. B. an Vorrichtungen oder Maschinenaufnahmen) wurden Zielposen als konfigurierbare Parameter behandelt.

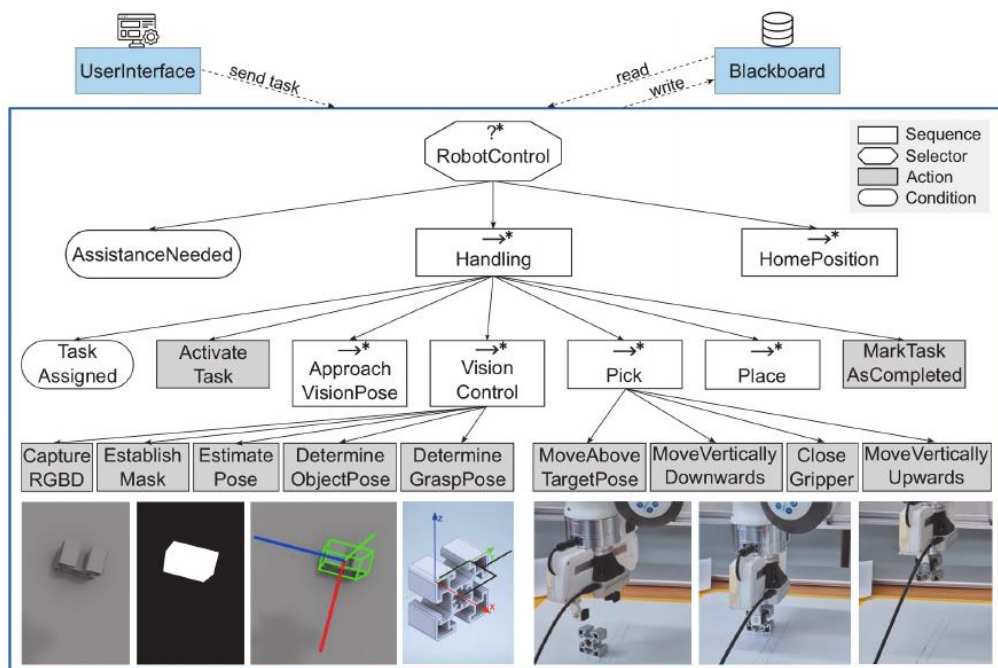


Abbildung 5: Behavior-Tree-Struktur zur flexiblen Ausführung von Pick-and-Place mit integrierter Wahrnehmung (aus [1])

Zur Erhöhung der Robustheit gegenüber Lageunsicherheiten und kostengünstiger Sensorik wurde zusätzlich ein Ansatz zur Optimierung des Greifens in Simulation erarbeitet. Dabei wird nicht ausschließlich visuelles Feedback genutzt, sondern auch taktile bzw. kraft-/momentenbasierte Informationen.

Der Ansatz folgt einem zweistufigen Verfahren: (i) ein Pre-Grasp-Agent positioniert den Endeffektor in eine geeignete Vorgriffpose, (ii) ein Grasp-Agent optimiert anschließend die Greifpose und den Greifvorgang anhand von Kraft-/Momentenrückmeldungen. Als Lernverfahren wurde ein Soft-Actor-Critic-Agent eingesetzt; die Trainingsumgebung wurde über OpenAI-Gym-Mechanismen und eine ROS/MoveIt-basierte

Ausführungskette in Gazebo gekoppelt. Um eine spätere Übertragbarkeit zu unterstützen, wurden während des Trainings Variationen in physikalischen Objekteigenschaften (z. B. Masse, Reibkoeffizient, Abmessungen) berücksichtigt. Dadurch wird der Agent nicht auf eine einzelne Idealgeometrie überangepasst, sondern lernt ein Verhalten, das gegenüber typischen Streuungen in industriellen Werkstücken robuster ist. In einer Validierung in einem definierten 3D-Arbeitsraum wurden Erfolgsraten für den Pre-Grasp- und den Greifschritt berichtet. Beispielsweise wurden Pre-Grasp-Erfolgsraten um ca. 88–100 % erreicht, während die vollständige Greiferfolgsrate je nach Objektform moderat ausfiel (z. B. ca. 70 % für Würfel, ca. 54 % für Quader, ca. 38 % für Zylinder und ca. 44 % bei zufälligen Objektvariationen). Die Ergebnisse zeigen, dass die Kombination aus RL und Kraft-/Momenteninformationen ein vielversprechender Weg ist, gleichzeitig aber weitere Verbesserungen (z. B. feinauflösende Taktiksensorik am Greifer) erforderlich sind, um industrielle Zielzuverlässigkeiten zu erreichen.

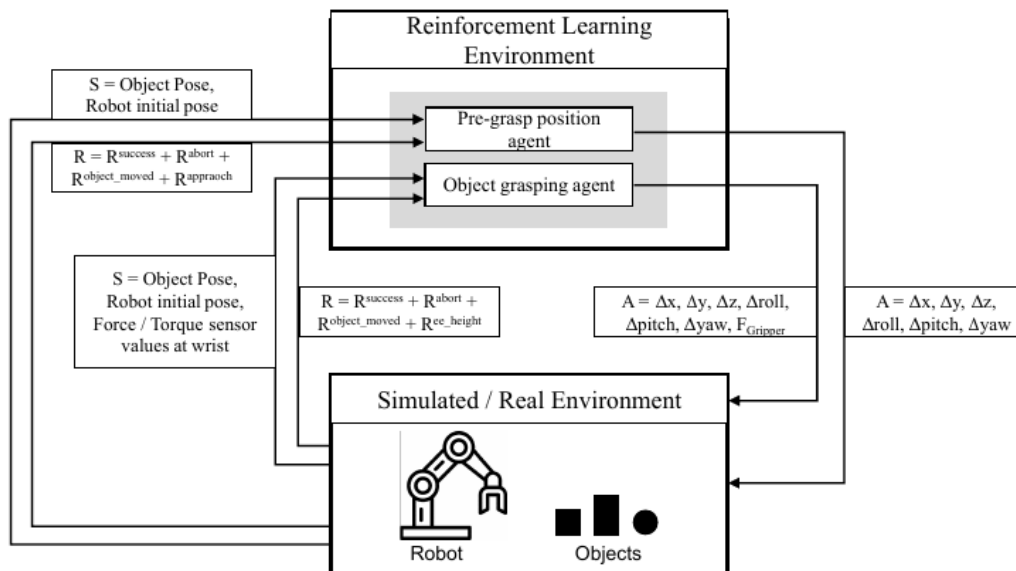


Abbildung 6: RL-Struktur zur Optimierung des Greifens (aus [4])

Als Ergebnis entstand ein konfigurierbares, BT-orchestriertes Skill-Konzept für Handhabungsaufgaben inklusive integrierter Objektlokalisierung/Posenschätzung und eines RL-basierten Optimierungsansatzes für robustes Greifen, Abbildung 6. Diese Bausteine sind direkt in Demonstrationsszenarien (AP8/9) nutzbar und bilden zusammen mit den Transportfähigkeiten (AP6) die Grundlage für übergeordnete Planung und Optimierung (AP7).

2.6 Arbeitspaket 6: Erlernen von Fähigkeiten im Transportprozess

Dieses Arbeitspaket adressiert Fähigkeiten im Transportprozess unter Nutzung eines autonomen mobilen Roboters (AMR). Ziel ist es, die Flexibilität des Robotersystems zu erhöhen und Werkende durch autonome Transporte von Rohmaterialien, Halbzeugen und Produkten zu entlasten. Ein Schwerpunkt liegt auf der robusten Lokalisierung und der Fähigkeit, Ziele auch bei Layoutänderungen zu erreichen. Zudem sollte die Identifikation von Zielstationen und Objekten so gestaltet werden, dass Werkende möglichst über Namen statt über Koordinaten arbeiten können. Zur risikominimierten und reproduzierbaren Entwicklung wurde eine Simulationsumgebung auf Basis von Nvidia Isaac Sim eingesetzt. In der Simulation konnten Navigations- und Transportfähigkeiten implementiert, getestet und iterativ verbessert werden, bevor eine Übertragung auf reale Systeme erfolgt. Die Simulation diente zugleich als Testbett für Domänenrandomisierung und für die Erzeugung synthetischer Daten zur KI-Modellentwicklung.

Da die semantische Umgebungswahrnehmung für Indoor-Navigation entscheidend ist, wurde ein Pipeline-Ansatz zur synthetischen Bilddatengenerierung entwickelt. In Isaac Sim wurden verschiedene Werkstattszenen mit Werkzeugmaschinen, Ablenkobjekten und variierenden Beleuchtungen zufällig erzeugt. Durch Domänenrandomisierung (Layout, Hintergründe, Lichtquellen, Texturen, Okklusion) wurden Trainingsdaten generiert, ohne manuell labeln zu müssen. Ziel war das Training eines Segmentierungs-/Detektionsmodells zur Erkennung von Werkzeugmaschinen als Landmarken bzw. Zielobjekte. Die synthetischen Datensätze wurden genutzt, um YOLO-Modelle (v8/v9) zu trainieren und zunächst auf synthetischen Validierungsbildern zu bewerten (siehe Abbildung).

Dabei wurden je Datensatz u. a. $mAP@50-95$, Precision und Recall ermittelt. Ergänzend wurde die Sim2Real-Fähigkeit auf einem kleinen realen Datensatz (30 gelabelte Bilder) geprüft. Die Ergebnisse zeigen: je nach Randomisierung wurden $mAP@50-95$ -Werte um ca. 0,66–0,80 erreicht. In mehreren Datensätzen lagen Precision-Werte $>0,94$ und Recall-Werte um ca. 0,77–0,85. Auf synthetischen Daten wurden mit YOLOv9 beispielsweise $mAP@50-95$ -Werte von 0,763 (Datensatz 1) bis 0,794 (Datensatz 3) erreicht; auf realen Bildern lagen die besten Ergebnisse bei $mAP@50-95 \approx 0,540$ (Datensatz 3), während eine aggressive Texture-Randomisierung (Datensatz 5) deutlich schlechtere Werte zeigte ($mAP@50-95 \approx 0,058$). Diese Spannweite unterstreicht die Notwendigkeit einer gezielten, anwendungsnahen Randomisierung statt maximaler Varianz. Aus den Experimenten wurde abgeleitet, dass nicht jede Randomisierung automatisch den Sim2Real-Transfer verbessert. Insbesondere die Wahl realistischer Hintergründe, geeigneter Lichtvariation und das Einbringen plausibler Ablenkobjekte kann die Robustheit erhöhen, während zu starke oder unplausible Texturvariationen kontraproduktiv sein können. Zudem zeigte sich, dass eine Erhöhung der Trainingsdatenmenge in erfolgreichen Setups die Transferleistung steigern kann, allerdings mit entsprechendem Trainingszeitaufwand.

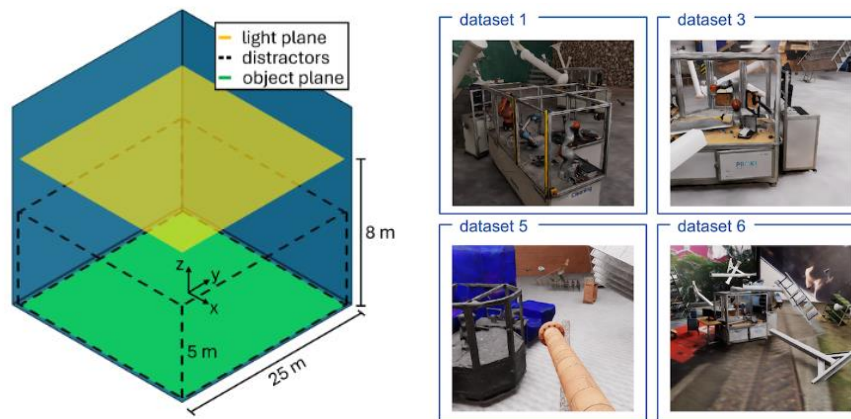


Abbildung 7: Synthetischen Szenengenerierung und Beispielbilder für Trainingsdatensätze (aus [2]).

Für die Steuerung wurde ein modularer Softwarestack aufgebaut, der Komponenten für GUI, Behavior-Tree-Logik und Roboterschnittstellen umfasst. Als Kommunikations- und Integrationslayer wurde ROS2 genutzt. Für die Navigation wurden etablierte Bausteine wie Nav2 (Planung, Hinderniserkennung, Regelung) sowie Visualisierungswerkzeuge (z. B. RViz) berücksichtigt. Durch Containerisierung (Docker) konnte der Stack konsistent auf Entwicklungsrechnern, Workstations und – perspektivisch – auf dem Roboter betrieben werden, was den Integrationsaufwand reduziert. Transportfähigkeiten wurden als Skills modelliert, die sich über Pre-Checks (z. B. Batteriestand, Freigaben, Zielverfügbarkeit) und Post-Checks (z. B. Ziel erreicht, Objekt korrekt aufgenommen/abgesetzt) absichern.

Als Behavior-Tree-Bibliothek wurde eine ROS2-nahe Implementierung genutzt. Die Skills lassen sich zu übergeordneten Abläufen (z. B. „Pick-and-Place im Transportkontext“) kombinieren und bilden eine Grundlage für spätere dynamische Skill-Ladung bzw. Kontextwechsel im BT. Für eine einfache Bedienung und Überwachung wurde ein webbasiertes Dashboard (NiceGUI) eingesetzt. Dies reduziert Installationsaufwand, da der Zugriff über den Browser erfolgt, und ermöglicht zugleich die zentrale Anzeige von Zuständen/Logs, das Starten von Abläufen und die Parametrierung. Zusätzlich wurden Mockup-Komponenten eingesetzt, um BT- und GUI-Funktionalität unabhängig von der rechenintensiven Simulation bzw. einem realen Roboter schnell testen zu können. In der Simulationsumgebung wurden exemplarisch Transportfähigkeiten implementiert, die das Anfahren spezifischer Positionen, das Bewegen von Transportboxen/Werkstückträgern sowie das Anfahren einer Ladestation umfassen. Darüber hinaus wurde die Steuerung von Hub-/Lift-Elementen (z. B. über Joint-Ansteuerung) betrachtet, um die in AP1 definierten, begrenzten Hubvorgänge im Höhenbereich der Transportaufgabe abzubilden.



Abbildung 8: Warenhaus mit AMR in der Simulation in Nvidia Isaac Sim

Für die Navigation in dynamischen Umfeldern wurde eine auf ROS2 und Nav2 aufbauende Methodik entwickelt, mit der Hindernisse in statische, semi-statische und dynamische Hindernisse eingeteilt werden. Die entwickelte Methodik ist in der Lage, das bestehende Softwaresystem zu verwenden und einen Umschaltmechanismus zu realisieren, sodass die Hindernisse umfahren werden und dabei die Fahrzeit minimal ist.

2.7 Arbeitspaket 7: Planung und Optimierung

Arbeitspaket 7 baut insbesondere auf den Arbeitspaketen 3, 4, 5 und 6 auf. In AP3 wurde das ERP-System angebunden, um auf Unternehmensinformationen aufzubauen. In AP4 wurden die relevanten Tätigkeiten identifiziert, die durch Automatisierungssystem ausgeführt werden sollen. In AP5 und AP6 wurden die Fähigkeiten entwickelt, um die Tätigkeiten durchzuführen. Nachdem eine Auswahl der Prozessschritte in AP4 getroffen wurde, konnten für die spätere Robotersteuerung die Transformation der Prozessbeschreibung in eine ausführbare Verhaltensstruktur durchgeführt werden.

Zunächst wird die BPMN-Datei, die in AP3 aus dem ERP-System ausgelesen wurden, in eine Behavior-Tree-Repräsentation überführt, die mit einer vorhandenen BT-Editor-/Ausführungsumgebung kompatibel ist. Dazu wurden nur jene BPMN-Aufgaben weiterverarbeitet, die über eine Textannotation verfügen (d. h. eine konkrete Ressource/Station adressieren). Die Transformation erzeugt (i) eine Baumstruktur mit Sequenz- und Auswahlknoten für typische Teilaufgaben sowie (ii) ein Exportformat (JSON) für die grafische Darstellung und spätere Codegenerierung. Template-basierte Erzeugung (z. B. über jinja2) ermöglicht dabei reproduzierbare Exporte. Anhand eines Beispielauftrags (z. B. Fertigung eines Bauteils „Greiffinger“) wurde gezeigt, dass aus ERP-Daten automatisch ein BPMN-Prozess und daraus ein BT abgeleitet werden kann. Die Struktur der Software ist in Abbildung dargestellt. In der BT-Struktur werden zentrale Knoten (z. B. „Suche Ziel“, „Material

einsetzen“, „Material entnehmen“) vorbereitet, die in späteren Arbeitspaketen durch konkrete Skills hinterlegt werden können. Die Zielposition der Maschine kann perspektivisch über Namensauflösung und ein Koordinaten-/Referenzsystem bestimmt oder initial manuell ergänzt werden.

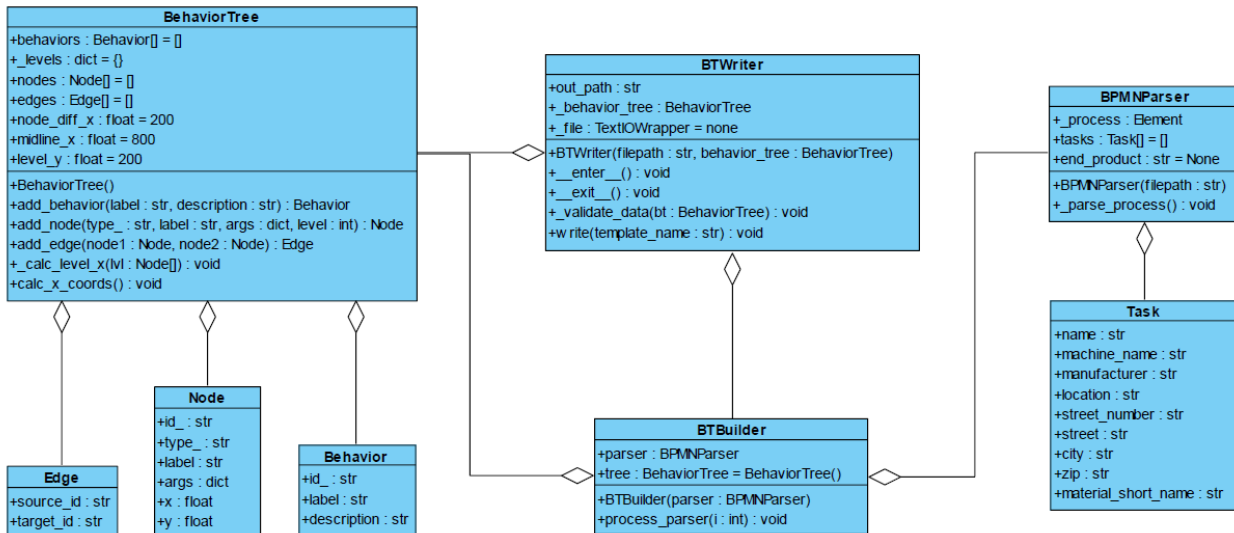


Abbildung 9: UML-Klassendiagramm zur Generierung von Behavior Trees

Zusätzlich wurden konsistente Vorlagen (Templates) für BPMN-Dateien sowie für BT-Exportformate definiert, um eine reproduzierbare, automatisierte Generierung zu ermöglichen. Die in AP2 erarbeitete Methodik fokussiert auf eine praxistaugliche Beschreibungskette von Fertigungsdaten über eine visuelle Prozesssicht hin zur ausführbaren Verhaltensstruktur. Als Ergebnis liegt eine durchgängige Methodik vor, die die Beschreibung werkstatorientierter Prozesse mit einer klaren Trennung zwischen verständlicher Darstellung (BPMN) und technischer Ausführung (Behavior Trees) ermöglicht. Die Methodik adressiert explizit die im Antrag geforderte Balance zwischen Detailgrad und Anwenderfreundlichkeit und unterstützt die Wandlungsfähigkeit durch klar definierte, erweiterbare Parameterstrukturen. Im Sinne des Antrags wurde die Ebene „Prozessschritt“ (z. B. Sägen, Drehen, Fräsen) weiter in ausführbare Aktionen zerlegt. Für die Automatisierung sind insbesondere Aktionen relevant, die Transport (Material anliefern/abholen) und Handhabung (Aufnehmen/Positionieren) betreffen.

Für kurzfristige, robuste Entscheidungen in dynamischen Umgebungen bieten sich heuristische Verfahren (z. B. Regelwerke, Prioritätslisten) an, während für wiederkehrende Entscheidungsmuster auch lernbasierte Methoden (z. B. Reinforcement Learning) perspektivisch geeignet sind. Die Arbeiten aus AP5 (RL für Greifoptimierung) und AP6 (KI-Modelle für Wahrnehmung) zeigen, dass Simulation als Trainings- und Testumgebung hierfür praktikabel ist. Für die Planungsaufgabe wurde daher ein Konzept dokumentiert, wie in einer Simulationsumgebung Zustände, Aktionen und Rewards definiert werden können, um lernbasierte Planungsstrategien zu trainieren. Ein wesentliches Projektergebnis ist die konsistente Kopplung zwischen Plan und Ausführung: Der Plan referenziert nicht Low-Level-Kommandos, sondern Skills (z. B. „NavigateToMachine“,

„LocateObject“, „Pick“, „Place“). Diese Skills sind in Behavior Trees kombinierbar und erlauben eine robuste Laufzeitbehandlung von Fehlern. Planänderungen können daher auf BT-Ebene durch Aktivieren/Deaktivieren von Teilbäumen bzw. Aktualisieren von Parametern umgesetzt werden, ohne die Gesamtsoftware neu zu programmieren. Die in AP7 erarbeiteten Konzepte wurden genutzt, um Demonstrationsszenarien (AP8/9) als durchgängige Kette abzubilden: von der prozessbasierten Aufgabenbeschreibung über die Auswahl passender Skills bis zur Ausführung in Simulation bzw. am Roboteraufbau.

2.8 Arbeitspaket 8: Aufbau eines Demonstrators

Für eine anwendungsnahe Validierung wurde ein prototypischer Datenzugriff auf das ERP-Umfeld am WZL umgesetzt. Die relevanten Auftrags- und Prozessinformationen lagen in einer Microsoft-SQL-Server-Struktur vor und konnten über definierte Abfragen extrahiert werden. Neben Auftragsdaten wurden Prozessschritte mit fortlaufender Reihenfolge sowie – sofern vorhanden – Maschinenzuordnungen und Metadaten (z. B. Maschinenbezeichnung, Hersteller) genutzt.

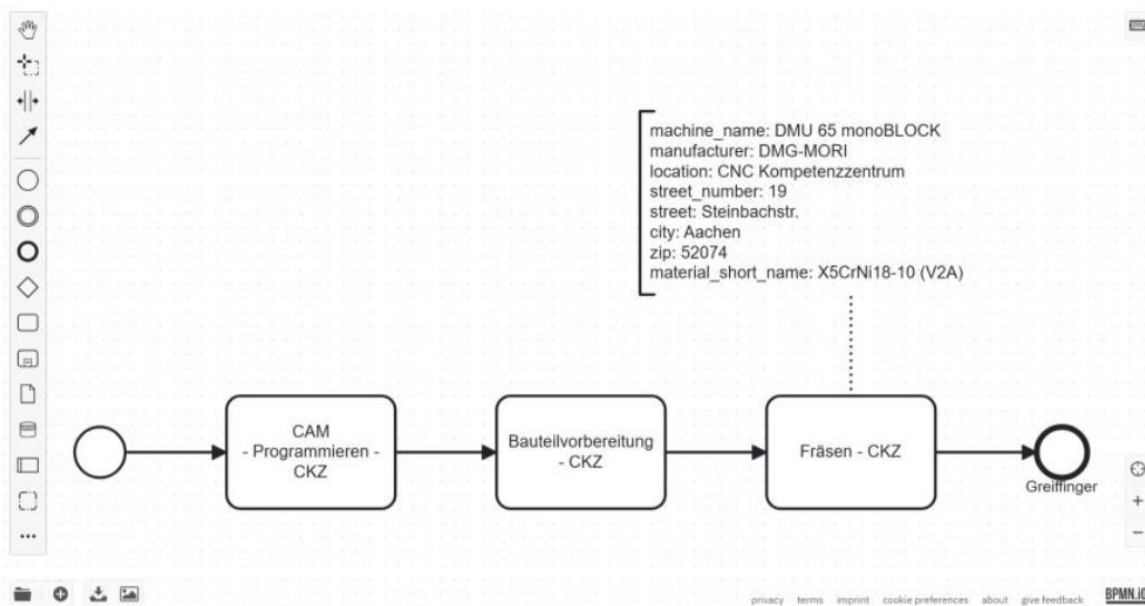


Abbildung 10: Darstellung des Produktionsprozesses des Demobauteils aus dem WZL als BPMN-Diagramm

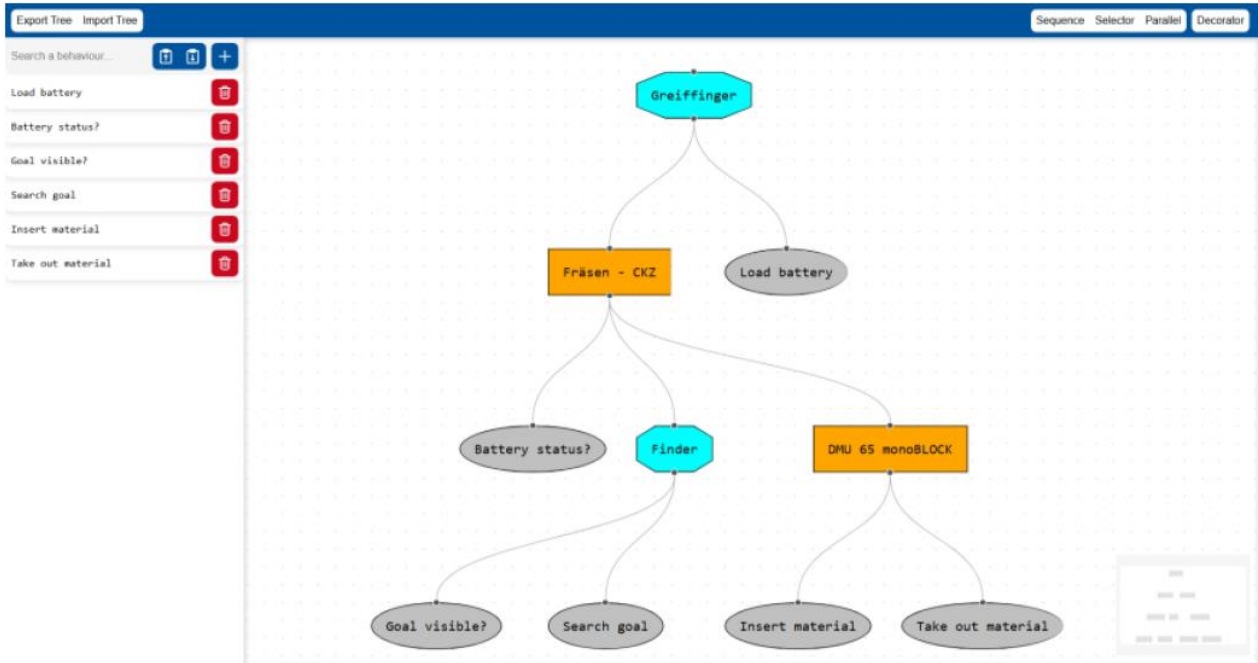


Abbildung 5: Generierter Behavior Tree des Demobauteils am WZL

Die Projektergebnisse wurden anwendungsnah in einem Demonstrator integriert und damit die Evaluation und Validierung durchgeführt. Der Demonstrator wurde so ausgelegt, dass die in AP1 definierten Kernkomponenten abgebildet werden: ein Industrieroboter/Manipulator mit Greifer und Kamera zur Handhabung, ein AMR/FTS-Kontext für Transportaspekte (in der Projektlaufzeit vorrangig simulationsgestützt), sowie ein KI-PC als zentrale Recheneinheit für KI-Modelle, Planung und Systemsteuerung. Für Handhabungvalidierungen wurde ein kollaborativer Roboter eingesetzt. Eindrücke zu den jeweils erzielten Ergebnissen vermitteln Abbildung 10 bis Abbildung 12.



Abbildung 6: AMR mit Aluminiumprofilaufbau und kollaborativem Roboter

2.9 Arbeitspaket 9: Evaluation und Validierung

In AP9 sollten die im Projekt entwickelten Methoden und Ansätze am Demonstrator hinsichtlich Einsetzbarkeit und Funktion getestet und abschließend bewertet werden. Als Grundlage wurden die in AP1 identifizierten Anwendungsfälle herangezogen. Erwartet wurde zudem, dass während der Umsetzung zusätzliche Use-Cases sichtbar werden, die in Demonstrationsszenarien überführt und in die Bewertung einbezogen werden. Die Evaluation wurde entlang der in AP1 formulierten nicht-funktionalen Anforderungen durchgeführt: Erweiterbarkeit, flexible Anwendung, Konfigurierbarkeit und Wiederverwendbarkeit. Zusätzlich wurden Qualitätskriterien für Wahrnehmung (Robustheit/Genauigkeit), für Handhabung (Erfolgsrate, Kollisionsfreiheit, Zielgenauigkeit) und für Transport (Navigationsrobustheit, Umplanung bei Hindernissen, Reproduzierbarkeit in Layoutänderungen) betrachtet. Wo quantitative Messungen möglich waren, wurden Kennzahlen aus den Entwicklungsarbeiten herangezogen; ergänzend erfolgten qualitative Bewertungen (z. B. Bedienbarkeit der GUI). Die Pick-and-Place-Demonstration zeigte, dass modulare Fähigkeiten in einem Behavior Tree kombinierbar und über eine GUI parametrierbar sind. Die BT-Struktur erlaubt eine klare Trennung zwischen Aufgabenlogik und Implementierung einzelner Skills. Fehlerfälle können in Fallback-Zweigen behandelt und bei Bedarf in einen Assistenzmodus überführt werden. Damit wird insbesondere die flexible Anwendung und Wiederverwendbarkeit der implementierten Fähigkeiten nachgewiesen. Die Integration einer KI-basierten 6D-Posenschätzung (z. B. FoundationPose) unterstützt die robuste Lokalisierung von Objekten auf Basis von Kameradaten. Ein wesentlicher Validierungspunkt ist die einfache Erweiterbarkeit auf neue Objekte ohne zusätzliches Training: Durch Bereitstellung von CAD-Modellen können neue Teile in den Erkennungsprozess aufgenommen und anschließend im selben Skill-Set verarbeitet werden.

Dies adressiert direkt KMU-Anforderungen an Variantenfähigkeit. Der in Simulation entwickelte RL-Ansatz zur Greifoptimierung wurde über Validierungsläufe bewertet. Dabei wurden Pre-Grasp-Erfolgsraten von ca. 88–100 % erreicht; die vollständige Greiferfolgsrate lag – abhängig von Objektgeometrie und Variationen – im moderaten Bereich (z. B. ca. 70 % für Würfel, ca. 54 % für Quader, ca. 38 % für Zylinder, ca. 44 % bei zufälligen Objektvariationen). Daraus wurde abgeleitet, dass taktile/kraftbasierte Rückmeldungen eine robuste Ergänzung zu visuellem Feedback darstellen, für industrielle Zielwerte jedoch eine weitergehende Sensorik (Taktik, Wrist-FT) und Trainings-/Reward-Verbesserungen sinnvoll sind. Transport-Skills wurden in Isaac Sim in Kombination mit ROS2 und Nav2 umgesetzt und über Video-/Szenarioläufe validiert. Die Ergebnisse zeigen, dass Behavior Trees als geeignete Programmierstruktur für Transportaufgaben dienen, da sie modulare Skills, Pre-/Postchecks und Fehlerbehandlung sauber integrieren. Die Containerisierung erleichtert die Wiederverwendbarkeit auf neuen Umgebungen. Einschränkungen ergeben sich vor allem aus Abhängigkeiten (z. B. Navigationsstack) und dem Aufwand, reale Roboterhardware zum Projektzeitpunkt verfügbar zu haben. Für die semantische Wahrnehmung wurden YOLO-Modelle auf synthetischen Datensätzen trainiert und sowohl synthetisch als auch auf einem kleinen realen Datensatz evaluiert. In der synthetischen

Evaluation wurden mAP@50–95-Werte um ca. 0,66–0,80 erzielt (YOLOv9), während die reale Evaluation je nach Datensatz mAP@50–95-Werte bis ca. 0,54 erreichte. Datensätze mit plausibler Layout-/Lichtvariation zeigten bessere Sim2Real-Ergebnisse als überstarke Textur-Randomisierung, die zu deutlichen Leistungseinbrüchen führte. Insgesamt bestätigt dies die Machbarkeit des Sim2Real-Transfers und liefert konkrete Empfehlungen zur Datengenerierung.

Die Evaluation und Validierung der im Projekt entwickelten Ansätze erfolgte entlang der in AP1 definierten funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen. Dabei konnte gezeigt werden, dass die entwickelte Lösung die wesentlichen Voraussetzungen für eine flexible Prozessautomatisierung in werkstatorientierten KMU-Umgebungen erfüllt: Über die GUI ist eine formale, für Werkende nachvollziehbare Beschreibung von Produkt- und Prozessinformationen möglich, aus der sich automatisierbare Abläufe ableiten lassen. Die modular aufgebaute Skill- und Behavior-Tree-Architektur erwies sich dabei als geeignet, Transport- und Handhabungsaufgaben flexibel zu kombinieren, wiederzuverwenden und an veränderte Prozessabläufe anzupassen. Für den Handhabungsprozess wurde validiert, dass unterschiedliche industrielle Bauteile anhand kamerabasierter 6D-Posenschätzung erkannt, in ihrer Lage bestimmt sowie durch konfigurierbare Greif- und Platzierabläufe verarbeitet werden können; zugleich zeigte sich, dass neue Objekte mit vertretbarem Aufwand in die Wahrnehmung integriert werden können. Im Transportkontext wurde insbesondere simulationsgestützt nachgewiesen, dass freie Navigation, das Umfahren von Hindernissen sowie die Anpassung an veränderte Layoutbedingungen grundsätzlich realisierbar sind. Ebenso wurde die Auffindbarkeit von Zielstationen durch semantische Objekterkennung adressiert. Die Validierung bestätigt darüber hinaus die in AP1 formulierten nicht-funktionalen Anforderungen hinsichtlich Erweiterbarkeit, flexibler Anwendung, Konfigurierbarkeit und Wiederverwendbarkeit, da sowohl einzelne Skills als auch ganze Ablaufketten mit begrenztem Anpassungsaufwand auf neue Szenarien übertragen werden konnten. Insgesamt zeigt die Evaluation, dass die im Vorhaben entwickelte Systematik die zentralen Anforderungen aus AP1 weitgehend erfüllt und eine tragfähige Grundlage für die weitere Überführung in industrielle Pilotanwendungen bietet; Einschränkungen bestehen derzeit noch bei der vollständigen realen Absicherung der Transportkette sowie bei Sicherheitsaspekten, die im Projekt bewusst nicht vertieft wurden.

2.10 Arbeitspaket 10: Projektmanagement und Dissemination

AP 10 umfasst das Projektmanagement sowie die Dissemination der Projektergebnisse. Dazu gehören Koordination zwischen den Projektpartnern, Berichterstattung, Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss (PA), Dokumentation des Projektfortschritts sowie die Veröffentlichung und Verwertung der Ergebnisse in Wissenschaft und Industrie. Zur operativen Umsetzung wurden Abstimmungen zwischen den Partnern durchgeführt. Die Arbeitspakete wurden entlang von Meilensteinen nachgehalten; Risiken (z. B. Verfügbarkeit von Hardware, Integrationsaufwand, Datenverfügbarkeit) wurden fortlaufend bewertet und durch simulationsgestützte Entwicklung, modulare Softwarearchitektur und gestufte Validierung adressiert.

Weitere Details zum in AP10 geleisteten Transfer in die Wirtschaft lassen sich Kapitel 7 entnehmen.

3 Verwendung der Zuwendung

Für die beschriebenen wissenschaftlichen Tätigkeiten wurden die in Tabelle 1 aufgeführten Personalaufwände für wissenschaftlich-technisches Personal der Stufe HPA-A und HPA-B benötigt.

Tabelle 1: Personaleinsatz

Forschungseinrichtung	Personal	Personenmonate
FVP	Wissenschaftlicher Angestellter HPA-A	16,25 PM
FVP	Technischer Angestellter HPA-B	7,25 PM
WZL	Wissenschaftlicher Angestellter HPA-A	23,73 PM

Die im Rahmen des Projektes beschäftigten studentischen Hilfskräfte waren projektbegleitend mit Recherche-, Dokumentations- und einfachen Implementierungsaufgaben betraut. Die Ausgaben für die Beschäftigung der Stufen HPA-C und HPA-F lassen sich dem beiliegenden zahlenmäßigen Nachweis (bZ) entnehmen.

Zur Bearbeitung des Vorhabens wurden die in Tabelle 2 aufgelisteten Geräte beschafft.

Tabelle 2: Gerätebeschaffungen

Forschungseinrichtung	Bezeichnung	Kosten
WZL	MAV 1500 Autonomous Mobile Robot Pre-Series (AMR) und MAiRA Pro M Cognitive Robot	55.311,20 €

Die Gerätebeschaffungen dienen ausschließlich der Realisierung der Demonstrationsszenarien. Diese Szenarien sollen so den beteiligten Forschungsstellen und Unternehmen ermöglichen, die gewonnen Erkenntnisse praktisch umzusetzen. Unternehmen des PA können an den Demonstrationsszenarien sowohl die Prozesse als auch die Fertigung von Beispielbauteilen validieren. Mit dem Aufbau der Szenarien am WZL wird gerade KMU mit begrenzten finanziellen Mitteln die Chance geboten, die gewonnen Erkenntnisse zeit- und praxisnah umzusetzen. Die einzelnen Posten zur Schaffung der Demonstrationsszenarien gliedern sich wie folgt:

Der Einsatz des Roboters war notwendig, um die geplanten Handhabungsaufgaben durchzuführen. Der Einsatz der AMR war notwendig, um die erlernten Fähigkeiten für den Transport von Ressourcen zu ermöglichen. Im Zuge dessen soll die AMR sowohl den Roboter als auch Transportgüter in der Werkstatt bewegen können. Teil dieses Pakets ist eine komplette Software-Lösung für die Erstellung und Navigation in der Fertigung. Beide Komponenten wurden in Arbeitspaket 8 zum Aufbau des Demonstrators verwendet.

4 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Insgesamt entsprechen die geleisteten Arbeiten dem begutachteten und bewilligten Antrag und waren daher für die Durchführung des Forschungsvorhabens notwendig und angemessen. Die ausgeführten Arbeiten wurden mit den Mitgliedern des PA besprochen und für das Erreichen des Projektziels gemeinsam für notwendig und angemessen befunden. Im Rahmen des Vorhabens wurden zwei der projektbeteiligten Unternehmen Software-Komponenten bereitgestellt, die zur Umsetzung der zu entwickelnden echtzeitfähigen Schnittstellen benötigt wurden. Aufgrund von marktbedingten Verzögerungen bei der Bereitstellung und Installation wurde die Projektlaufzeit kostenneutral um sechs Monate verlängert, um die abschließenden Evaluierungen und den Transfer in die Industrie in vollem Umfang leisten zu können.

Einzelne Anpassungen — insbesondere der Verzicht auf Verwaltungsschalen zugunsten einer schlankeren BPMN/YAML-Repräsentation (AP2) sowie der simulationsgestützte Schwerpunkt bei den Transportfähigkeiten (AP6) — wurden aus Aufwands- und Risikogesichtspunkten vorgenommen und erwiesen sich als zielführend.

5 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Mit einem Anteil von über 99% stellen KMUs den dominierenden Anteil an Unternehmen in NRW. Ihre hohe Wirtschaftsleistung sowie die Beschäftigung von 57.9% aller Arbeitnehmer:innen begründet ihre gesamtgesellschaftliche Bedeutung. Oftmals haben sich KMUs auf die Herstellung komplexer und kundenindividueller Produkte in kleinen Stückzahlen spezialisiert, was sie aufgrund ihres Alleinstellungsmerkmals zu “Hidden Champions” macht. Die hohe Produktvarianz sowie die niedrigen Stückzahlen erschweren jedoch die Umsetzung von wirtschaftlich sinnvollen Automatisierungskonzepten.

Zudem fehlen KMUs in der Regel personelle und finanzielle Ressourcen zur Umsetzung von Digitalisierungskonzepten. Hier sind exemplarisch Technologien wie die Robotik, das Internet of Things (IoT) sowie Algorithmen der Künstlichen Intelligenz (KI) zu nennen. Der Status quo der Digitalisierung in KMU wird mithilfe des Digitalisierungsindex gemessen. Dieser ist 2020 mit einem Wert von 4,2 von 10 als “wenig” digitalisiert einzuordnen. Die Covid-19 Pandemie hat insgesamt zwar für einen Digitalisierungsschub gesorgt, gleichzeitig führten wirtschaftliche Verluste jedoch zu einem Rückgang der Investitionsbereitschaft. Im produzierenden Gewerbe werden Roboter (kollaborative und vollautomatisierte) in 10% der Unternehmen mit weniger als 50 Mitarbeiter:innen, in 24% der Unternehmen mit 50 bis 249 Mitarbeiter:innen eingesetzt. Bei größeren Unternehmen steigt der Anteil auf 53 % an. Der Grund liegt an fehlenden personellen Ressourcen, die über die nötige Expertise verfügen. 10% der produzierenden Unternehmen nutzen KI-Algorithmen. Die Nutzung fortschrittlicher Robotik und KI bietet das Potenzial, die Produktivität branchenübergreifend um 30% zu steigern sowie die Lohnkosten um 18-33% zu senken. Diese Effizienzsteigerungen sind essenziell für den Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit von KMU am Produktionsstandort Deutschland. Dem herrschenden und sich potenziell verschärfenden Fachkräftemangel kann nur mit Automatisierungslösungen begegnet werden. Diese müssen jedoch einfach zugänglich sein, sodass sie möglichst wenig Expertise auf Seiten der Anwender erfordern.

Die Ergebnisse des Vorhabens bieten die Möglichkeit zum Aufbau einer kompakten Automatisierungslösung bestehend aus einem Cobot, der durch die Kombination mit dem FTS an zusätzlicher Flexibilität gewinnt. Das Resultat des Vorgängerprojektes war ein Cobot, der sich in bestehende Strukturen innerhalb einer WOF integrieren lässt und die Beladung von Werkzeugmaschinen übernimmt. Aufbauend darauf soll der Cobot nun befähigt werden, den Einsatzort innerhalb der WOF autonom zu wechseln. Durch die übergeordnete Optimierung wird sichergestellt, dass der Roboter dort eingesetzt wird, wo ein Einsatz sinnvoll ist. Die Sinnhaftigkeit richtet sich zunächst vordergründig nach wirtschaftlichen Kriterien, jedoch können perspektivisch auf Grundlage einer detaillierten Prozessbeschreibung auch Faktoren wie Ergonomie und Nachhaltigkeit in die

Optimierung miteinbezogen werden. Produktionsabläufe sind häufig abhängig von externen und internen Faktoren. So sind Unternehmen abhängig von Zulieferern und Kunden, aber auch von der Verfügbarkeit ihrer eigenen Mitarbeiter. Aktuell herrschende Lieferengpässe und Rohstoffknappheiten verdeutlichen diese Abhängigkeiten. Die erzielten Ergebnisse unterstützen KMUs bei diesen Herausforderungen, indem es Mitarbeiter:innen unterstützt oder ersetzt und die Gesamteffizienz des Produktionsprozesses durch Minimierung von Stillstandzeiten steigert.

Zu diesem Zweck wurden die entwickelten Konzepte, Modelle und Softwarebausteine laufend dokumentiert. Dazu zählen u. a. Spezifikationen für Prozess- und Skill-Repräsentationen, Schnittstellenbeschreibungen, Konfigurations- und Deploymentskripte (Container/ROS2) sowie Test- und Evaluationsartefakte für Demonstrations-szenarien. Diese Dokumentation bildet die Grundlage für die interne Wiederverwendung und die externe Weitergabe im Transfer. Die Evaluation bestätigt die Tauglichkeit des Projektansatzes für KMU. Die Ergebnisse sind ausreichend, um in Folgeprojekten gezielt in Richtung industrieller Pilotierung zu gehen, insbesondere durch Ausbau realer Datensätze, Härtung der Transportkette auf Hardware und durch eine weiter verbesserte, geführte Nutzerinteraktion. Die Ansätze können besonders in KMU, in denen einfache Handhabungs- und Transportaufgaben einen großen Anteil an der täglichen Arbeit haben, sinnvoll eingesetzt werden. Das entwickelte System kann dann niederschwellig programmiert werden und reduziert dadurch die Kosten der Integration durch spezialisierte Integrationsunternehmen stark.

6 Wissenstransfer in die Wirtschaft

Das Ziel des Projektes, kleinen und mittelständischen Unternehmen den Zugang zu innovativen, alternativen Lösungen für die flexible Automatisierung von Prozessen in der WOF zu ermöglichen, wurde erreicht. Hierbei sind neue Methoden und Strategien entstanden, die durch den kombinierten Einsatz von FTS und Cobot sowie eine übergeordnete Prozessmodellierung und -optimierung zu einer Maximierung des (betriebswirtschaftlichen) Nutzens führen. Mit Hilfe des Demonstrators wurden die entwickelten Ansätze zur Steigerung des Automatisierungsgrads in der WOF umfangreich validiert und die Methoden und Werkzeuge aus den beschriebenen Arbeitspaketen applikations- und industrienah getestet.

Für den Aufbau des Demonstrators wurde auf einzelne Elemente des Demonstrators aus den Vorgängerprojekten FlexARob bzw. FlexARob2 zurückgegriffen. Der Demonstrator ermöglicht es den beteiligten Forschungsstellen und Unternehmen, die gewonnenen Erkenntnisse praktisch umzusetzen. Interessierte Unternehmen können anhand des Demonstrators die Umsetzungsmöglichkeiten eigener Automatisierungsprozesse prüfen und validieren.

Mit dem Demonstrator am WZL wird gerade KMU mit begrenzten finanziellen Mitteln die Chance geboten, die gewonnenen Erkenntnisse zeit- und praxisnah umzusetzen. Auch die vorgestellten Software-Komponenten können durch die umfangreichen Erfahrungen und die langjährige Zusammenarbeit im Verbund WZL und FVP zielgerichtet umgesetzt werden. Dabei kann über den erarbeiteten Leitfaden sichergestellt werden, dass eine temporäre Evaluation in den Unternehmen unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten möglich ist.

In den nächsten zwei Jahren wird der Demonstrator im Rahmen von Führungen interessierten Industrieunternehmen präsentiert, mit dem Ziel, dass die Erkenntnisse des Forschungsprojekts durch das Konsortium im Rahmen von bi- oder multilateralen Projekten an Industrieunternehmen weitergegeben werden.

Im Rahmen des Projektes EDIH 2.0 werden Projekte mit der Wirtschaft durchgeführt. Innerhalb der Projekte werden Verbesserungspotentiale in den Unternehmen identifiziert, die durch Technologien adressiert werden können. Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts werden in diesem Rahmen vorgestellt und sind ein Lösungsbaustein.

Der Wissenstransfer in die Wirtschaft kann hierauf aufbauend wie folgt skizziert werden:

- **Unternehmenskategorie Endanwender:** Firmen aus der Branche der industriellen Produktion, bei denen die Bearbeitung von variantenreichen Produkten auf Werkzeugmaschinen zum täglichen Geschäft gehört. Die Anwender wurden durch die im Projekt entwickelten Methoden und Ansätze in die Lage versetzt, abzuschätzen, für

welche Prozesse sich eine flexible Automatisierung lohnt. Darüber hinaus können beispielhafte Prozesse mit dem Demonstrator validiert und so die Akzeptanz durch die Mitarbeitenden erhöht werden.

- **Unternehmenskategorie Experten für Robotik und Automatisierung:** Diese Gruppe von Unternehmen wurde durch die Forschungsergebnisse in die Lage versetzt, das bestehende Portfolio an Automatisierungslösungen zu erweitern und Gesamtlösungen für die flexible Automatisierung von Prozessen in der WOF anbieten zu können. Durch ihre Fachkompetenz in der Implementierung von Automatisierungslösungen können diese Unternehmen vor allem im Zuge der Konzeptionierung und der Umsetzung eines sicheren Gesamtsystems unterstützen und außerdem die Ergebnisse von SPrinter als Multiplikatoren über das Projektende hinaus verbreiten.
- **Unternehmenskategorie Technologieanbieter und IT-Unternehmen:** Um eine effiziente Einbindung von Hard- und Softwarekomponenten in die entwickelte Methodik sicherzustellen, waren auch Technologie- und IT-Anbieter Teil des PA. Diese können SPrinter durch ihre Expertise fachlich beraten und profitieren selbst durch das Erschließen neuer, innovativer Anwendungsfelder für ihre Produkte. Außerdem können diese Unternehmen die Einhaltung von gängigen Industriestandards im Zuge von SPrinter beurteilen und ebenfalls als Multiplikatoren fungieren.

7 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen (vom Projektstart bis zum Projektende)

Während der Projektlaufzeit sind vier wissenschaftliche Veröffentlichungen erfolgt:

- Belke, Manuel; Groß, Theresia; Petrovic, Oliver und Brecher, Christian. "Fähigkeitsbasierte Programmierung von Industrierobotern: Entwicklung konfigurierbarer Handhabungsaufgaben unter Verwendung von Behavior Trees und 6D-Posenschätzung" Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, vol. 120, no. 5, 2025, pp. 303-309. <https://doi.org/10.1515/zwf-2025-1049>
- M. Belke, T. Peters, O. Petrovic and C. Brecher, "Synthetic image data generation for the training of a segmentation algorithm for machine tool recognition," IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Madrid, Spain, 2025, pp. 1-7, doi: 10.1109/IECON58223.2025.11221985.
- M. Belke, T. Joeressen, O. Petrovic and C. Brecher, "Optimization of Industrial Robot Grasping Processes with Q-Learning," 2023 5th International Conference on Control and Robotics (ICCR), Tokyo, Japan, 2023, pp. 113-119, doi: 10.1109/ICCR60000.2023.10444848.
- M. Belke, M. Phatak, O. Petrovic and C. Brecher, "Optimization of robot grasping using reinforcement learning in simulation" 2024 WGMHI Fachkolloquium, Rostock, 2024

Darüber hinaus wurden die in Tabelle 3 dargelegten Transfermaßnahmen geleistet.

Tabelle 3: Durchgeführte Transfermaßnahmen

Transfermaßnahme	Datum
Erstellung und Pflege einer Projekt-Website	01.04.2023 bis 31.05.2025
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	10.04.2023
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	18.07.2023
Wöchentliche digitale Showroom Events in Aachen (FVP)	01.04.2022 bis 31.12.2023
Vorstellung der Projektergebnisse in den Vorlesungen „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“, „NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen“ und „Automatisierungstechnik für Produktionssysteme“ des WZL	04/2023 bis 05/2025
Vorstellung des Projektes und der erzielten Ergebnisse auf dem General Meeting der EXAPT Systemtechnik GmbH in Wiesbaden	03.05.2023 bis 04.05.2023
Vorstellung des Projekts und der erzielten Projektergebnisse im Rahmen des Aachener Werkzeugmaschinenkolloquiums AWK 2023 in Aachen	11.05.2023 bis 12.05.2023
Vorstellung der Projektergebnisse auf der Weltleitmesse für Produktionstechnologie EMO 2023 in Hannover	18.09.2023 bis 23.09.2023
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	18.07.2023
Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP in Aachen	21.02.2024 bis 22.02.2024
Vorstellung des Projektes und der erzielten Ergebnisse auf der Hauptversammlung der EXAPT Systemtechnik GmbH in Aachen	15.05.2024
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	18.07.2024
Vorstellung der Ergebnisse auf der Internationalen Messe für Metallbearbeitung AMB 2024 in Stuttgart	10.09.2024 bis 14.09.2024
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	15.10.2024
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	10.03.2025
Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP in Aachen	08.04.2025 bis 09.04.2025
Vorstellung des Projektes und der erzielten Ergebnisse auf der Hauptversammlung der EXAPT Systemtechnik GmbH in Aachen	14.05.2025 bis 15.05.2025
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	14.05.2025
Vorstellung der Projektergebnisse auf der Weltleitmesse für Produktionstechnologie EMO 2025 in Hannover	22.09.2025 bis 26.09.2025
Treffen des Projektbegleitenden Ausschusses	30.09.2025

7.2 Geplante Transfermaßnahmen (nach Projektende)

Es sollen in Zukunft sowohl öffentliche Förderformate als auch bilaterale Industrieprojekte an dieses Projekt anschließen. Der Demonstrator dient dabei als greifbares Transferobjekt, an dem die Funktionsweise des Frameworks sowie die Integration von Wahrnehmung, Skills und Behavior Trees anschaulich gezeigt werden kann. Aufbauend auf den im Projekt erzielten Ergebnissen werden aktiv Folgeprojekte angestrebt, um (i) die Integration in reale KMU-Umgebungen zu vertiefen, (ii) die Bedienbarkeit weiter zu erhöhen (z. B. Zieldefinition über Namen/Referenzen statt Koordinaten), (iii) Safety-/Security-Aspekte ergänzen und (iv) Planungs- und Optimierungsfunktionen unter realen Datenbedingungen zu validieren.

Am 29. und 30. April 2027 findet das Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium (AWK) statt. Unter dem Leitthema „Shaping Future Production“ werden einem breiten Publikum u. a. die Inhalte und Ergebnisse des SPinterR-Projektes vorgestellt. Der enge fachliche Austausch und die Diskussion mit zahlreichen Anwendern sowie ausgewiesenen Experten anderer Forschungsinstitute werden dabei neue Impulse liefern. Darüber hinaus sind seitens WZL und FVP weitere Transfermaßnahmen nach Projektende geplant.

Die geplanten Maßnahmen lassen sich Tabelle 4 entnehmen.

Tabelle 4: Geplante Transfermaßnahmen

Transfermaßnahme	Datum
Vorstellung des Projektes und einer Ergebnisse im WZL-Jahresbericht 2026	01/2026
Veröffentlichung des Schlussberichts auf den Websites von WZL und FVP	03/2026
Vorstellung der Projektergebnisse in den Vorlesungen „Mechatronik und Steuerungstechnik für Produktionsanlagen“, „NC-Programmierung von Werkzeugmaschinen“ und „Automatisierungstechnik für Produktionssysteme“ des WZL	04/2026 bis 11/2026
Vorstellung des Projekts und der erzielten Projektergebnisse im Rahmen des Aachener Werkzeugmaschinenkolloquiums AWK 2027 in Aachen	29.04.2027 bis 30.04.2027
Vorstellung der Projektergebnisse auf der Messe „Toolmanagement in der Praxis 2026“ in Böblingen	04.03.2026 bis 05.03.2026
Vorstellung der Ergebnisse auf der Mitgliederversammlung FVP in Aachen	06.05.2026 bis 07.05.2026
Vorstellung des Projektes und der Projektergebnisse auf der Hauptversammlung und technischen Tagung der EXAPT Systemtechnik GmbH in Aachen	06.05.2026 bis 07.05.2026
Vorstellung der Ergebnisse auf der Internationalen Messe für Metallbearbeitung AMB 2026 in Stuttgart	15.09.2026 bis 19.09.2026

8 Literaturverzeichnis

- [1] Belke, Manuel; Groß, Theresia; Petrovic, Oliver und Brecher, Christian. "Fähigkeitsbasierte Programmierung von Industrierobotern: Entwicklung konfigurierbarer Handhabungsaufgaben unter Verwendung von Behavior Trees und 6D-Posenschätzung" Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, vol. 120, no. 5, 2025, pp. 303-309. <https://doi.org/10.1515/zwf-2025-1049>
- [2] M. Belke, T. Peters, O. Petrovic and C. Brecher, "Synthetic image data generation for the training of a segmentation algorithm for machine tool recognition," IECON 2025 – 51st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Madrid, Spain, 2025, pp. 1-7, doi: 10.1109/IECON58223.2025.11221985.
- [3] M. Belke, T. Joeressen, O. Petrovic and C. Brecher, "Optimization of Industrial Robot Grasping Processes with Q-Learning," 2023 5th International Conference on Control and Robotics (ICCR), Tokyo, Japan, 2023, pp. 113-119, doi: 10.1109/ICCR60000.2023.10444848.
- [4] M. Belke, M. Phatak, O. Petrovic and C. Brecher, "Optimization of robot grasping using reinforcement learning in simulation" 2024 WGMHI Fachkolloquium, Rostock, 2024

9 Forschungseinrichtungen

Forschungsvereinigung Programmiersprachen für Fertigungseinrichtungen e.V.

Theaterstraße 12

52062 Aachen

Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen University

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen

Steinbachstraße 19

52074 Aachen