

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 20266 N/1

Thema

AutoWerk - Automatisierte, vernetzte, robuste Werkzeuglogistik mittels Assistenzrobotik

Berichtszeitraum

01.09.2018 - 30.11.2020

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BLV) e.V.
Schlachte 31, 28195 Bremen

Forschungseinrichtung(en)

- 1: Technische Universität München
Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml)
Boltzmanstraße 15, 85748 Garching
- 2: Fraunhofer-Gesellschaft e.V.
Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
Am Technologiezentrum 2, 86159 Augsburg

Garching/Augsburg, 12.03.2021

Ort, Datum



Florian Ried (fml)

Christian Haerdlein
Digital unterschrieben
von Christian Haerdlein
Datum: 2021.03.12
13:17:30 +01'00'

Christian Härdtlein (IGCV)

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Gefördert durch:

Kurzfassung

Die Prozesse der Werkzeuglogistik werden aktuell nahezu ausschließlich manuell verrichtet. Bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Produktionslogistik im Allgemeinen und der Werkzeuglogistik im Speziellen stoßen diese inzwischen immer häufiger an ihre Grenzen. Dies äußert sich in Verzögerungen in der Werkzeugbereitstellung, was im schlimmsten Fall die Unterbrechung von Produktionsaufträgen zur Folge hat.

Vor diesem Hintergrund setzte sich das Forschungsvorhaben AutoWerk die Entwicklung eines Konzepts zur Automatisierung und Vernetzung der Werkzeuglogistik zum Ziel, das die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Werkzeugbereitstellung erhöht und zusätzlich eine Fokussierung menschlicher Arbeitskraft auf wertschöpfende Prozesse erlaubt. Das Konzept beinhaltet die Befähigung mobiler Assistenzroboter, Werkzeuge selbständig und termintreu an Fertigungsmaschinen bereitzustellen, beziehungsweise diese zurück in ein Werkzeuglager zu transportieren.

Zur Automatisierung der erforderlichen Transport- und Handhabungsprozesse mussten sowohl hardware- als auch softwareseitig neuartige Lösungen entwickelt werden. Auf Seiten des mobilen Roboters wurden unter anderem eine Möglichkeit zur automatisierten Konfiguration für unterschiedliche Werkzeugtypen und eine simulationsbasierte Zielposenplanung des Manipulators umgesetzt. Zur Planung und Steuerung der automatisierten Werkzeuglogistik wurde ein zentrales Leitsystem entwickelt, das auf Grundlage von Fertigungsaufträgen Transportaufträge für Werkzeuge ermittelt, optimiert und an die mobilen Roboter übermittelt. Außerdem stellt es eine umfassende Benutzeroberfläche zur Verfügung, über die Werkskräfte direkt und intuitiv mit dem System interagieren können.

Die einzelnen Elemente wurden anschließend implementiert und zu einem Gesamtsystem integriert. Dessen Funktionsfähigkeit und industrielles Potential konnte anhand einer demonstratorischen Umsetzung der automatisierten Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik bestätigt werden.

Das angestrebte Forschungsziel wurde erreicht.

Abstract

Tool logistics currently consist almost exclusively of manual processes. With simultaneously increasing demands on production logistics in general and tool logistics in particular, these processes are now increasingly reaching their limits. This manifests itself in delays in the in-plant provision of tools, which in the worst case results in the interruption of production orders.

Considering those circumstances, the AutoWerk research project targeted an increase in performance and reliability of in-plant tool provision. This was to be achieved by automating and interconnecting tool logistics. The key component of the AutoWerk concept is to enable mobile robots to autonomously supply tools to production machines on time, or to transport them back to a tool store. Therefore, the robots must be able to perform both transport and tool handling processes.

In order to do so, new solutions including hardware and software have been developed. On the mobile robot side, among other things, a possibility for automated configuration for different tool types and a simulation-based target pose planning of the manipulator were implemented. For the planning and control of automated tool logistics, a central control system was developed that determines and optimises transport orders for tools on the basis of production orders and transmits them to the mobile robots. It also provides a comprehensive user interface through which factory personnel can interact directly and intuitively with the system.

The individual elements were then implemented and integrated into a complete system. Its functionality and industrial potential could be confirmed by means of an exemplary use case of automated tool logistics using mobile robotics.

The research goal was achieved.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	I
Abstract	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	VI
1 Einleitung	1
1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung	1
1.2 Forschungsziel	2
1.3 Lösungsweg zum Erreichen des Forschungsziels	4
2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft	5
2.1 Grundlagen des Werkzeugwesens	5
2.1.1 Der Werkzeugkreislauf	6
2.1.2 Werkzeugorganisation	8
2.1.3 Werkzeuglogistik	9
2.2 Aktuelle Forschungsergebnisse	9
3 Anforderungen an eine automatisierte Werkzeuglogistik	13
3.1 Eingrenzung des Projekthorizonts und Systemkontext	13
3.2 Einsatzszenarien einer automatisierten Werkzeuglogistik	16
3.3 Aufnahme der Ist-Situation in Unternehmen	17
3.4 Anforderungen an das Gesamtsystem	19
3.4.1 Anforderungsanalyse Robotersystem	20
3.4.2 Anforderungsanalyse Planung und Steuerung	26
3.5 A priori Wirtschaftlichkeitsbewertung	28
4 Planung und Steuerung der automatisierten Werkzeuglogistik	33
4.1 Konzeptionierung der Planung und Steuerung	33
4.2 Umgebung und externe Schnittstellen des Leitsystems	34
4.3 Prozesskette innerhalb des Leitsystems	37
4.4 Elemente und Architektur des Leitsystems	41
4.4.1 Datenverwaltung	42

4.4.2	Transportauftragsermittlung	45
4.4.3	Flottenmanagement	47
4.4.4	Datenbestandsüberwachung	48
4.4.5	Kommunikationssystem	50
4.4.6	Benutzeroberfläche	52
4.4.7	Gesamtarchitektur	55
4.5	Implementierung der Systembestandteile	56
4.5.1	Daten- und Persistenzschicht	57
4.5.2	Logikschicht	58
4.5.3	Präsentationsschicht	59
4.6	Implementierung des Kommunikationssystems	65
4.7	Verifikation und Validierung des Leitsystems	66
5	Gestaltung steuerungstechnischer und physischer Schnittstellen an Übergabepunkten	69
5.1	Spezifikationen des mobilen Roboters Scout®active	69
5.1.1	Mobile Plattform	70
5.1.2	Industrierobotersystem	70
5.2	Ansteuerung des Industrierobotersystems mit ROS	71
5.3	Automatisiertes Greiferwechselsystem	75
5.4	Erweiterung der Transportkapazität	82
6	Integration zu Demonstrator und Evaluierung des erarbeiteten Konzepts	83
6.1	Demonstratorische Umsetzung	83
6.1.1	Systemintegration	83
6.1.2	Ablauf des demonstratorischen Anwendungsfalls	84
6.2	Evaluation und Erfolgskontrolle	86
7	Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick	91
7.1	Zusammenfassung und Ausblick	91
7.2	Verwendung der zugewendeten Mittel	94
7.3	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	94
7.3.1	Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	94
7.3.2	Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	96
7.3.3	Zusammenfassung der wichtigsten bereits erfolgten Maßnahmen	96

Literaturverzeichnis	99
Abbildungsverzeichnis	109
Tabellenverzeichnis	111
Anhang A Morphologische Kästen	A-1

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
ASK CLI	Alexa Skills Kit Command Line Interface
ASR	Automatic Speech Recognition
AWS	Amazon Web Services
CAD	Computer-Aided Design
CAN	Controller Area Network
CoAP	Constrained Application Protocol
CONSENS	CONceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems
CRUD	Create, read, update, delete
DOM	Document Object Model
EPCIS	Electronic Product Code Information Services
ER	Entity relationship
fml	Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
GTIN	Global trade item number
GUI	Graphical User Interface
HSK	Hohlschaftkegel
HTML	Hypertext Markup Language
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IGCV	Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik
ID	Identifikationsnummer

IP	Internet Protocol
IT	Informationstechnik
IPv6	Internet Protocol Version
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
LED	Light-Emitting Diode
M2M	Machine to Machine
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
MRI	Mensch-Roboter Interaktion
MVVM	Model-View-ViewModel
NLG	Natural Language Generation
NLU	Natural Language Understanding
NUC	Next Unit of Computing
PDP	Pickup-and-Delivery Problem
PPS	Produktionsplanung und –steuerung
QR	Quick Response
REST	Representational State Transfer
ROS	Robot Operating System
SFF	Small Form Factor
SGTIN	Serialized global trade item number
SK	Steilkegel
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SRDF	Semantic Robot Description Format
SysML	Systems Modeling Language
TCP	Transmission Control Protocol

TE	Teilergebnis
TLS	Transport Layer Security
TUM	Technische Universität München
URDF	Universal Robot Description Format
URI	Uniform Resource Identifier
USB	Universal Serial Bus
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VRP	Vehicle Routing Problem
VUI	Voice User Interface
WLAN	Wireless Local Area Network
WZM	Werkzeugmaschine
XML	Extensible Markup Language

1 Einleitung

Verfasser: Florian Ried

1.1 Wissenschaftlich-technische und wirtschaftliche Problemstellung

Die voranschreitende Entwicklung des Marktes hin zu immer individualisierteren Kundenwünschen – und der damit einhergehenden Erwartungshaltung an Unternehmen, diese zu erfüllen – stellt das verarbeitende Gewerbe vor große Herausforderungen. Diese äußern sich unter anderem in steigende Variantenzahlen bei gleichzeitig sinkenden Stückzahlen je Variante bis hin zur Losgröße 1 sowie einer Dynamisierung der Produktlebenszyklen. Als Reaktion darauf sind Industrieunternehmen gezwungen, ihre Produktionsprozesse auf eine höhere Flexibilität und Effizienz hin auszurichten. [Rei-2017]

Um diesen gewachsenen Anforderungen zu begegnen, wurden bereits zahlreiche Forschungsprojekte in den Bereichen der Produktionstechnik und Produktionslogistik durchgeführt, so auch an den an diesem Projekt beteiligten Forschungseinrichtungen (siehe beispielsweise [Lie-2017] und [Fra-2020]). Im Gegensatz dazu wurde die Werkzeuglogistik als Teilgebiet des Werkzeugwesens bislang nur wenig untersucht, obwohl diese eine bedeutsame Rolle im Produktionsprozess einnimmt. Dies zeigt sich unter anderem dadurch, dass laut einer Umfrage unter knapp 300 Industriebetrieben der Anteil der Werkzeugkosten an den gesamten Produktionsausgaben bei 12,1 % liegt [Hee-2015]. Die zentrale Aufgabe der Werkzeuglogistik ist es, an Fertigungsmaschinen benötigte Werkzeuge termintreu bereitzustellen und abgenutzte beziehungsweise nicht mehr benötigte Werkzeuge abzutransportieren. Die oben genannten Veränderungen in der Produktion führen somit aus Sicht der Werkzeuglogistik zu einer höheren Anzahl an Rüstvorgängen an den Maschinen und dadurch zu einer höheren Anzahl an Werkzeugbereitstellungen. Infolgedessen stoßen auch in diesem Bereich bestehende Lösungen an ihre Grenzen, in denen die Prozesse der Werkzeuglogistik größtenteils manuell und wenig koordiniert durchgeführt werden. Als Konsequenz daraus müssen circa 15 % der Produktionsaufträge aufgrund nicht bereitstehender Werkzeuge unterbrochen werden [Abe-2009].

In besonderem Ausmaß sind davon kleine und mittlere Unternehmen (KMU), die einen großen Teil des produzierenden Gewerbes in Deutschland ausmachen, betroffen.

[Abe-2011]. Diese erleben aufgrund ihrer Nachfragestruktur die Trends zu hoher Variantenvielfalt und geringen Stückzahlen meist überdurchschnittlich stark [Wie-2004]. Zusätzlich sind KMU durch üblicherweise erheblich geringere Budgets für Forschung und Entwicklung oftmals nicht in der Lage, eigenständige Entwicklungen zur Lösung dieser Probleme durchzuführen.

1.2 Forschungsziel

Parallel zu den in Abschnitt 1.1 genannten Herausforderungen eröffnen sich aufgrund der Entwicklungen in den Bereichen der Digitalisierung und Automatisierung neue Möglichkeiten, diesen zu begegnen. So ist es sowohl mobilen Roboterplattformen als auch Greifrobotern möglich, immer komplexere Tätigkeiten autonom durchzuführen. [Hau-2013] Gleichzeitig führen sinkende Anschaffungskosten zu zusätzlichen wirtschaftlichen Einsatzszenarien von Robotern in der Industrie. Infolgedessen verdoppelte sich die Anzahl an Industrierobotern zwischen 2014 und 2020 laut der International Federation of Robotics [IFR-2019]. Außerdem erlauben die Werkzeuge der Digitalen Fabrik, die Komplexität der Fertigung handzuhaben und eine effiziente Steuerung der Werkzeuglogistik zu realisieren [Rei-2017].

Das Ziel des Forschungsprojekts AutoWerk lag in der Kombination mobiler Assistenzrobotik, Greifrobotik und intelligenten Steuerungsalgorithmen zu einem durchgängigen Gesamtkonzept für eine automatisierte Werkzeuglogistik und dessen demonstratorischer Umsetzung. Dabei lassen sich drei zentrale Arbeitsbereiche ableiten, anhand derer die Effizienz der Werkzeuglogistik mittels mobiler Roboter erhöht werden soll. Dies ist zum Ersten die Automatisierung der Werkzeuglogistik. Die mobilen Roboter sollen in der Lage sein, sowohl Transportprozesse als auch Handhabungsprozesse zur Entnahme und Bestückung von Werkzeugen durchzuführen. Der zweite Bereich ist die Vernetzung aller beteiligten Stakeholder der Werkzeuglogistik. Um effiziente Prozesse innerhalb der Werkzeuglogistik zu realisieren, ist ein konsistenter Informationsaustausch unerlässlich. Neben den mobilen Robotern zur Werkzeugbereitstellung sind dabei unter anderem die Fertigungsmaschinen, Werkzeuglager- und -aufbereitung sowie die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) zu berücksichtigen. Im dritten Arbeitsbereich muss eine Lösung für die Mensch-Roboter Interaktion (MRI) in der Werkzeuglogistik entwickelt werden. Auch mit dem Einsatz mobiler Roboter werden komplexe Handhabungsvorgänge bei der Bedienung von Fertigungsmaschinen wie das Einsetzen von Werkzeugen aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und der Effizienz weiterhin vom Menschen ausgeführt. Dementsprechend muss es ohne spezifisches Fachwissen möglich sein, die Roboter anzusteuern und ihr Verhalten zu verstehen.

Zur Strukturierung dieses Hauptziels ist das Forschungsprojekt in neun wissenschaftlich-technische und fünf wirtschaftliche Teilergebnisse (TE) gegliedert. Diese sind in Tabelle 1-1 und Tabelle 1-2 aufgelistet.

Tabelle 1-1: *Wissenschaftlich-technische Teilergebnisse*

TE1	Autonome und wegoptimierte Navigation des mobilen Assistenzroboters in verschiedenen Produktionssystemen zum Transport von Werkzeugen
TE2	Automatische Konfiguration des Roboters entsprechend des jeweiligen Transportauftrags (z.B. Auswahl Greifer je nach Werkzeugtyp)
TE3	Automatische Identifikation von Werkzeugen durch den Roboter als Basis für die selbständige Werkzeugsuche
TE4	Durchführung von Montagetätigkeiten durch den Roboter (z.B. Werkzeug und Aufnahme) auch während der Fahrt (z.B. aus Lager zu Maschine)
TE5	Automatische Aufnahme und Abgabe von Werkzeugen in verschiedenen Bereichen (z.B. Zuführsysteme von Maschinen, Lagerplätze, Schärf- und Messmaschinen)
TE6	Berücksichtigung der Kooperation mit Mitarbeitern durch eine Mensch-Maschine Schnittstelle
TE7	Planungs- und Steuerungssystem für die Koordination und Überwachung der Aufträge für die mobilen Assistenzroboter
TE8	Schnittstellen für die Systemintegration in die bestehende IT-Landschaft
TE9	Demonstrator zur Evaluierung des entwickelten Gesamtsystems

Tabelle 1-2: *Wirtschaftliche Teilergebnisse*

TE10	Methode zur Potenzialermittlung zum wirtschaftlichen Einsatz eines mobilen Assistenzroboters in der industriellen Produktion
TE11	Entlastung und Unterstützung der Maschinenbediener
TE12	Aussagen zur Akzeptanz von mobiler Assistenzrobotik in der Produktion
TE13	Erhöhung der Prozesssicherheit und -effizienz
TE14	Minimierung von Stillstandszeiten

1.3 Lösungsweg zum Erreichen des Forschungsziels

Die Bearbeitung des Forschungsprojekts erfolgte in enger Kooperation zwischen dem Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München (TUM) und dem Fraunhofer Instituts für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV). Um die in Abschnitt 1.2 genannten Forschungsziele zu erreichen, diente das im Antrag formulierte Vorgehen aus sechs aufeinander aufbauenden Arbeitspaketen als Orientierung.

Ausgangspunkt der Arbeiten ist eine Zusammenfassung der Grundlagen sowie des Standes der Wissenschaft in den Themenbereichen Werkzeugwesen in Allgemeinen und Werkzeuglogistik im Speziellen in Kapitel 2.

Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 3 nach einer Eingrenzung des Projekthorizonts und des Systemkontextes eine umfassende Analyse, Aufbereitung und Dokumentation der Ausgangssituation in Unternehmen. Anschließend werden Anforderungen an eine ganzheitliche automatisierte Werkzeuglogistik formuliert und beispielhafte Use Cases mit verschiedenen Automatisierungsgraden definiert.

In Kapitel 4 wird die Planung und Steuerung einer automatisierten Werkzeuglogistik vorgestellt. Nach einer Beschreibung der Anforderungen an diesen Teilbereich werden die Softwarearchitektur und Implementierung der Systembestandteile diskutiert.

Anschließend geht Kapitel 5 auf die Gestaltung steuerungstechnischer und physischer Schnittstellen zwischen den mobilen Robotern und ihrer Umgebung ein. Auf eine Beschreibung des im Rahmen des Projektes eingesetzten Roboters folgt dabei die Vorstellung der Entwicklung der Ansteuerung und automatisierten Konfiguration für selbigen.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse der beiden vorangegangenen Kapitel miteinander kombiniert und die Integration von Software- und Hardwarekomponenten zu einem funktionsfähigen Demonstrator der automatisierten Werkzeuglogistik beschrieben. Das Kapitel schließt mit einer kritischen Evaluation des umgesetzten Konzepts.

Abschließend resümiert Kapitel 7 die erzielten Forschungsergebnisse und gibt einen Ausblick auf zukünftige Schritte im Bereich der Werkzeuglogistik.

2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft

Verfasser: Florian Ried

In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Kernelemente und -prozesse des Werkzeugwesens zusammengefasst und zentrale Begriffe definiert. Darauf aufbauend werden aktuelle Forschungsergebnisse auf dem Gebiet diskutiert.

2.1 Grundlagen des Werkzeugwesens

Zur Fertigung von Gütern spielen neben Werkstücken und Bearbeitungsmaschinen auch Werkzeuge eine essenzielle Rolle. Sie sind für die unmittelbare Interaktion mit dem Werkstück verantwortlich und dementsprechend für den Produktionsprozess unverzichtbar. Alle Aufgaben zur Planung, Steuerung und operativen Durchführung der Werkzeugflüsse und werkzeugbezogenen Informationsflüsse werden nach Mayer unter dem Begriff des Werkzeugwesens zusammengefasst [May-1988]. In der Fachliteratur existieren unterschiedliche Ansätze zur Strukturierung des Werkzeugwesens, die in Abhängigkeit des Fokus der Arbeiten teilweise voneinander abweichen [Gei-1997; Jen-2007; May-1988; Mum-1999; Ste-1984]. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde im Sinne einer einheitlichen und eindeutigen Nomenklatur eine generalisierte Strukturierung gewählt. Wie Abbildung 2-1 illustriert, unterteilt sie das Werkzeugwesen in die Teilgebiete der Werkzeugorganisation, Werkzeugversorgung und des Werkzeugeinsatzes.

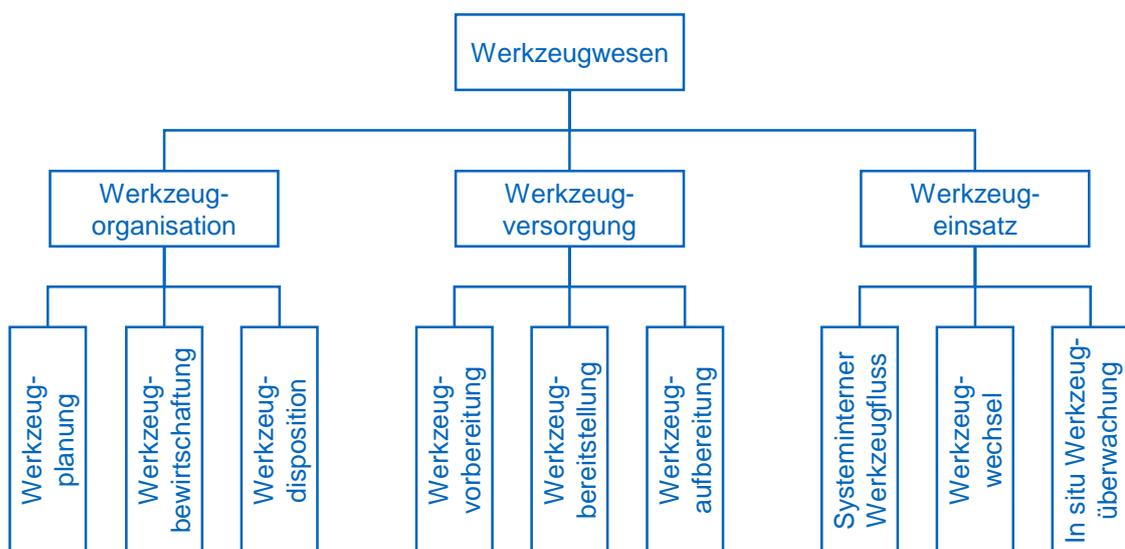


Abbildung 2-1: Strukturierung der Werkzeuglogistik im Projekt AutoWerk

Die Bestandteile der Werkzeugversorgung und des Werkzeugeinsatzes im Folgenden im operativen Kontext des Werkzeugkreislaufs betrachtet, während die Werkzeugorganisation in Abschnitt 2.1.2 separat vorgestellt wird.

2.1.1 Der Werkzeugkreislauf

Im Gegensatz zu Bearbeitungsmaschinen, die im Betrieb stationär sind, und Werkstücken, die beginnend als Rohmaterialien oder Halbzeuge den Fertigungsprozess ausgehend von Wareneingangslagern linear in Richtung Warenausgang durchlaufen, bewegen sich Werkzeuge zyklisch innerhalb eines Unternehmens. Diese zyklische Verkettung von Prozessen im Werkzeugwesen wird auch als Werkzeugkreislauf bezeichnet. Wie Abbildung 2-2 skizziert, setzt er sich aus vier Grundfunktionen zusammen. [Mum-1999]

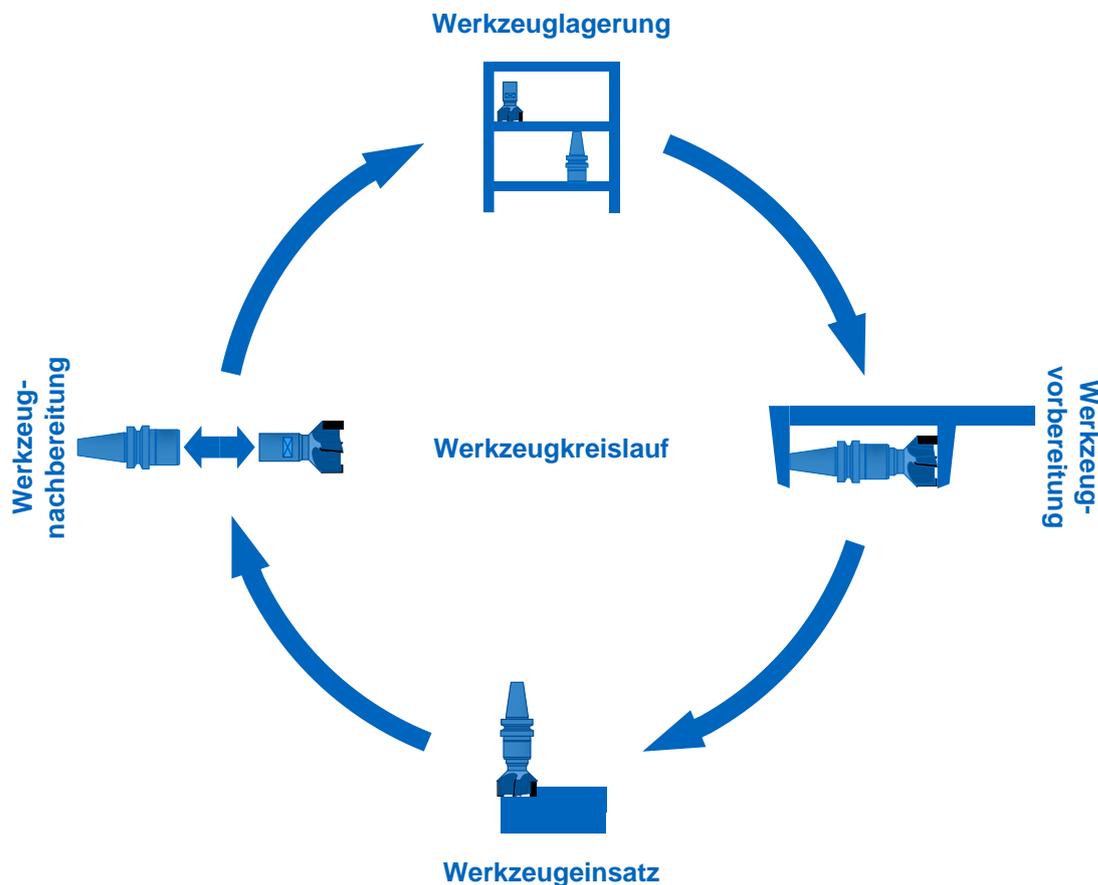


Abbildung 2-2: Grundfunktionen des Werkzeugkreislaufs nach [Mum-1999]

Der Werkzeugkreislauf beginnt mit der **Werkzeugvorbereitung**. Dabei werden die Werkzeuge beziehungsweise deren Bestandteile zunächst auftragsbezogen kommissioniert. Anschließend erfolgt für Systemwerkzeuge, die aus mehreren Komponenten bestehen, die Montage des Werkzeugs. Hierbei werden die einzelnen Bestandteile des

Komplettwerkzeugs – im Fall von spanenden Werkzeugen Schneidkörper, Werkzeugaufnahme und Verlängerungen – zusammengesetzt. Für Einzelwerkzeuge und bereits montierte Komplettwerkzeuge entfällt dieser Prozess. In der Werkzeugvoreinstellung, dem letzten Schritt der Werkzeugvorbereitung, werden die Werkzeuge vermessen und gegebenenfalls auftragsbezogen angepasst. [Gei-1997]

Im **Werkzeugeinsatz** fließen Werkstück- und Werkzeugstrom zusammen. Er ist damit der einzige werkzeugbezogene Prozess, der unmittelbar zur Wertschöpfung beiträgt, und stellt dadurch den Auslöser für alle anderen Prozesse des Werkzeugkreislaufs und gleichzeitig des gesamten Werkzeugwesens dar. Der Werkzeugeinsatz beginnt mit der Übernahme des Werkzeugs in das Fertigungssystem. Dies kann entweder direkt in den Wirkungsbereich der Werkzeugmaschine oder in – vor allem in der spanenden Fertigung verbreiteten – internen Werkzeugspeicher erfolgen. Im zweiten Fall muss im nächsten Schritt ein interner Werkzeugtransport sowie das Einwechseln des Werkzeugs stattfinden. Anschließend kommt es zur Interaktion zwischen Werkzeug und Werkstück, in der die Beschaffenheit des Werkstücks in gewünschter Weise verändert wird. Abhängig von der Werkzeugmaschine wird der Fertigungsprozess zusätzlich von einer In-situ Werkzeugüberwachung kontrolliert. Sobald das Werkzeug abgenutzt ist oder nicht mehr benötigt wird, wird es aus dem Fertigungssystem ausgeschleust und sein Einsatz endet. [Jen-2007; May-1988]

Auf den Werkzeugeinsatz folgt im Werkzeugkreislauf die **Werkzeugnachbereitung**. Nach einer gründlichen Reinigung der Werkzeuge folgt eine Prüfung ihres Zustands. Das Ergebnis dieser Prüfung entscheidet, ob die Werkzeuge für einen weiteren Einsatz geeignet sind, instandgesetzt werden müssen, oder sie das Ende ihrer Lebensdauer erreicht haben und entsorgt werden müssen. Systemwerkzeuge werden basierend auf dieser Entscheidung sowie Vorgaben der Werkzeugorganisation (siehe Abschnitt 2.1.2) gegebenenfalls demontiert. Verschlossene Werkzeuge werden abschließend in der Werkzeuginstandsetzung für zukünftige Einsätze aufbereitet. [Gei-1997]

Die vierte Grundfunktion im Werkzeugkreislauf ist die **Werkzeuglagerung**. Abhängig von der Entscheidung in der Werkzeugnachbereitung und der Art der Werkzeuge werden diese entweder als Komplettwerkzeuge, einzelne Komponenten oder Einzelwerkzeug eingelagert. Die Lagerung selbst kann dabei abhängig von den jeweiligen Rahmenbedingungen zentral, dezentral oder in hybriden Lagerstrategien erfolgen. [Abe-2009; Gei-1997]

Zwischen und teilweise auch innerhalb der vier Grundfunktionalitäten des Werkzeugkreislaufs sind Transportprozesse erforderlich. Zusammengefasst werden diese Pro-

zesse des maschinenexternen Werkzeugflusses als **Werkzeugbereitstellung** bezeichnet. Die Werkzeugbereitstellung wird in der Praxis entweder von den Maschinenbedienern, Lagerarbeitern oder Werkskräften eigens für den Werkzeugtransport durchgeführt, wobei manuelle Prozesse aktuell deutlich überwiegen. [Ste-1984; Abe-2009]

2.1.2 Werkzeugorganisation

Um Werkzeugkreislauf aufrechtzuerhalten, sind neben den in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Tätigkeiten zusätzliche Prozesse notwendig, die nicht unmittelbar am operativen Werkzeugfluss beteiligt sind. Diese Prozesse werden unter dem Begriff der Werkzeugorganisation zusammengefasst und sind für den werkzeugbezogenen Informationsfluss verantwortlich. Sie lassen sich weiterhin in die Bereiche der Werkzeugplanung, Werkzeugbewirtschaftung und Werkzeugdisposition unterteilen (siehe Abbildung 2-1).

Aufgabe der **Werkzeugplanung** ist es, das optimale Werkzeugspektrum zu ermitteln, um alle Produktionsschritte des Unternehmens durchführen zu können. In diese Entscheidung fließen sowohl technologische als auch ökonomische Aspekte ein. Jedem erforderlichen Werkzeugtypen werden anschließend konkrete Bearbeitungsaufgaben und Einsatzparameter basierend auf Herstellerangaben oder eigener empirischer Studien zugewiesen. Um das Werkzeugspektrum stets auf einem aktuellen Stand zu halten, wird es im Rahmen der Werkzeugplanung in regelmäßigen Intervallen kritisch überprüft und gegebenenfalls bereinigt. [Gei-1997]

Während sich die Werkzeugplanung mit der Art der eingesetzten Werkzeuge beschäftigt, bestimmt die **Werkzeugbewirtschaftung** deren Menge für einen mittel- bis langfristigen Zeithorizont. Die Ermittlung des Bedarfs an den jeweiligen Werkzeugtypen kann dabei entweder auf Grundlage der prognostizierten Auftragslage des Unternehmens oder verbrauchsgesteuert bei Unterschreitung eines Mindestbestandes erfolgen. Basierend auf den Ergebnissen der Bedarfsermittlung wird im nächsten Schritt die Werkzeugbeschaffung ausgelöst, die alle Prozesse von der Bestellung bis zur Annahme beinhaltet. Dabei ist zu beachten, dass für eine zuverlässige Bedarfsermittlung eine exakte Werkzeugbestandsführung unverzichtbar ist, die ebenfalls Gegenstand der Werkzeugbewirtschaftung ist.

Die **Werkzeugdisposition** verfügt über den kurzfristigsten Fokus innerhalb der Werkzeugorganisation. Sie legt die arbeitsgangbezogene und terminliche Feinplanung des Werkzeugeinsatzes auf den konkreten Fertigungsmaschinen fest. Außerdem ist die

Werkzeugdisposition dafür verantwortlich, die Prozesse zur Werkzeugvor- und -nachbereitung sowie der anschließenden Werkzeuglagerung zu planen, auszulösen und zu überwachen. [Gei-1997; Mum-1999]

2.1.3 Werkzeuglogistik

In der vorgestellten Beschreibung des Werkzeugwesens fehlt bislang der Begriff der Werkzeuglogistik, wie er im Titel des Forschungsprojekts zu finden ist. Dies ist vor allem darin begründet, dass die Strukturierung des Werkzeugwesens aus Sicht der Produktion geschaffen wurde. Die Werkzeuglogistik erfüllt wie die gesamte Intralogistik eine Querschnittsaufgabe. Sie beinhaltet sämtliche Transport- und Lagerprozesse im Werkzeugkreislauf sowie die zugehörigen Informationsflüsse. Die Aufgabe der Werkzeuglogistik lässt sich anhand der 6-R der Logistik im Kontext des Werkzeugwesens in der Bereitstellung der

- richtigen Werkzeuge zum
- richtigen Zeitpunkt am
- richtigen Ort in der
- richtigen Qualität und Quantität mit den
- richtigen Informationen zu den
- richtigen Kosten zusammenfassen.

Mit Blick auf die in Abschnitt 2.1 vorgestellten Gliederung des Werkzeugwesens lassen sich die Prozesse der Werkzeuglogistik der Werkzeugbereitstellung, Werkzeuglagerung, Werkzeugvor- und -nachbereitung sowie verschiedenen Teilprozessen der Werkzeugorganisation zuordnen. [Gün-2013; Weh-2020; Abe-2009]

2.2 Aktuelle Forschungsergebnisse

Nachdem die Grundlagen des Werkzeugwesens in vorangegangenen Kapitel erläutert wurden, sollen im Folgenden ausgewählte Ergebnisse der aktuellen Forschung auf dem Gebiet des Werkzeugwesens zusammengefasst und bezüglich der Problemstellung im Projekt AutoWerk diskutiert werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts ToolCloud wurde am Lehrstuhl fml eine durchgängige Digitalisierung von Werkzeugdaten entlang des gesamten Lebenszyklus eines Werkzeugs untersucht. Dementsprechend wurden nicht nur Unternehmen, in denen Werkzeuge genutzt werden, sondern die gesamte Wertschöpfungskette inklusive

Herstellern von Werkzeugen und Produktionsmaschinen sowie Instandsetzungsbetrieben betrachtet. Zur Realisierung der unternehmensübergreifenden Datenbasis wurde eine Cloud-Lösung entwickelt, die es den Teilnehmern der Supply Chain ermöglicht, in Echtzeit auf aktuelle Werkzeugdaten zuzugreifen und fehleranfällige Papierdokumentationen zu eliminieren. Weiterhin eröffnet die gewonnene Transparenz der Werkzeugdaten die Nutzung von Optimierungspotentialen im Werkzeuglebenszyklus. Zur dafür erforderlichen eindeutigen und automatisierten Identifikation von Werkzeugen wurde ein Konzept mit lasergravierten 2D-Barcodes entwickelt. Eine Betrachtung von Werkzeugtransporten innerhalb oder zwischen Unternehmen fand nicht statt. [Rös-2017; Rös-2015]

Auch das Forschungsprojekt SmartTool der Technischen Universität Darmstadt beschäftigte sich mit der Digitalisierung von Werkzeugdaten. Im Gegensatz zu ToolCloud stellte es allerdings die Informationstransparenz im unternehmensinternen Werkzeugkreislauf in den Mittelpunkt. Ziel des Projektes war es, zum einen wirtschaftliche Möglichkeiten zur Erhebung der benötigten Daten inklusive prozessinterner Größen während des Werkzeugeinsatzes zu finden. Zum anderen sollte eine Vernetzung der Systeme, in denen werkzeugbezogene Daten gespeichert und verarbeitet werden, realisiert werden. Dies wurde unter anderem durch die Entwicklung eines intelligenten Werkzeugs erreicht. Dieses ist durch interne Sensorik und ein mikroelektronisches System in der Lage, Messwerte, Lokation und Ähnliches zu erfassen, zu verarbeiten und an ein im Projektverlauf entwickeltes Track & Trace System zu übertragen. Auf die Planung, Steuerung und Durchführung von Werkzeugtransporten wurde im Projekt SmartTool nicht eingegangen. Im Folgeprojekt SmartTool++ wurde eine Testumgebung für das in SmartTool entwickelte Konzept aufgebaut sowie die bestehende Lösung optimiert und das Track & Trace System um eine App erweitert. [Bos-2017; Gro-2019]

Neben der Digitalisierung des Werkzeugwesens und der Schaffung von Datentransparenz, die zusätzlich zu den vorgestellten Forschungsprojekten beispielsweise auch von Schaupp et al. im Rahmen eines allgemeinen Vorgehens zur Potentialanalyse thematisiert wird, liegt ein weiterer Schwerpunkt der Forschung auf dem Potential des Outsourcings einzelner Aufgaben des Werkzeugwesens an externe Dienstleister [Sch-2017b]. In diesem Zusammenhang wird einerseits aus Sicht des Werkzeuganwenders unter anderem die Abwägung zwischen ökonomischen Nutzen der Einbindung von Dienstleistern und dem Verlust von werkzeugspezifischem Know-how aus dem Unternehmen diskutiert [Abe-2007; Abe-2009]. Andererseits schlagen Sun et al. eine Methodik zur Just-in-time Werkzeugbereitstellung aus Dienstleistersicht vor. [Sun-2016].

Ein weiterer Gegenstand der aktuellen Forschung ist die Entwicklung von Lagerstrategien für Werkzeuge. Wie bereits in Abschnitt 2.1.1 vorgestellt, existieren bezüglich der Anzahl und Lokalisierung der Lager sowie des Zustandes, in dem Werkzeuge gelagert werden, mehrere Alternativen. Um die optimale Lagerstrategie unter Berücksichtigung der jeweiligen Anforderungen und Rahmenbedingungen zu identifizieren, schlagen Schaupp et al. ein zweistufiges Prozedere vor. Im ersten Schritt werden Ausprägungen relevanter Einflussfaktoren ermittelt, die in statische, semistatische, dynamische und Tracking-Daten unterteilt werden. Im zweiten Schritt wird auf deren Basis zunächst der Lagerzustand und anschließend der Lagerort des Werkzeugs festgelegt. Transporte zwischen den Lagern und anderen Stationen des Werkzeugkreislaufs werden dabei nur oberflächlich betrachtet. [Sch-2016]

Um die hohe Komplexität innerhalb des Werkzeugwesens zu adressieren, erstellten Bosch und Metternich ein Ursache-Wirkungs-Diagramm für eine geringe Werkzeugverfügbarkeit und listen Komplexitätstreiber auf. Anschließend werden Methoden zur Abschätzung der Komplexität im Werkzeugwesen auf Prozess- und Werkzeugebene vorgestellt. [Bos-2018]

3 Anforderungen an eine automatisierte Werkzeuglogistik

Verfasser: Christian Härdtlein, Florian Ried

Bevor mit der Entwicklung für ein Konzept der automatisierten Werkzeuglogistik begonnen werden konnte, musste zunächst eine Eingrenzung des Projekthorizonts vorgenommen werden. Diese Eingrenzung war einerseits hinsichtlich des Aufgaben- und Verantwortungsbereichs, der im Forschungsprojekt thematisiert wird, und andererseits hinsichtlich des betrachteten Werkzeugspektrums erforderlich. Aufgrund der zahlreichen Verflechtungen der Werkzeuglogistik als Querschnittsfunktion mit anderen Teilbereichen des Werkzeugwesens musste im Projekt klar definiert werden, welche konkreten Prozesse Teil des zu entwickelnden Konzepts sind und wo dessen Systemgrenzen liegen. Die enorme Diversität von Werkzeugen von mehreren Tonnen schweren Stempeln und Matrizen in Presswerken bis hin zu Bohrern mit Durchmessern von weniger als einem Millimeter macht außerdem eine Limitierung der betrachteten Werkzeuge unabdingbar. Im nächsten Schritt konnten dann die Anforderungen an ein System zur Automatisierung der Werkzeuglogistik unter den getroffenen Randbedingungen erfasst und definiert werden. Dazu wurde zunächst die Ist-Situation in der Werkzeuglogistik ausgewählter Unternehmen aufgenommen. Auf dieser Basis wurden anschließend Anforderungen an das Gesamtsystem sowie exemplarische Einsatzszenarien für eine automatisierte Werkzeuglogistik aufgestellt.

3.1 Eingrenzung des Projekthorizonts und Systemkontext

Basierend auf Kapitel 1 hat für eine effiziente Werkzeuglogistik die rechtzeitige Bereitstellung benötigter Werkzeuge an Maschinen eine zunehmend hohe Priorität. Im produzierenden bzw. metallverarbeitenden Gewerbe bzw. in KMU zählen Werkzeugmaschinen aufgrund ihrer hohen Zuverlässigkeit und Prozessgenauigkeit zu den bedeutendsten Produktionsmitteln [Bre-2017]. Als Werkzeugmaschine wird nach DIN 69651 eine „[...] mechanisierte und mehr oder weniger automatisierte Fertigungseinrichtung, die durch relative Bewegung zwischen Werkstück und Werkzeug eine vorgegebene Form am Werkstück oder eine Veränderung einer vorgegebenen Form an einem Werkstück erzeugt, [...]“ bezeichnet [DIN-69651]. Die mit Werkzeugmaschinen bzw. Werkzeugen realisierbaren Fertigungsverfahren werden nach DIN 8580 in sechs Hauptgruppen unterteilt [DIN-8580]. Im Rahmen des Projekts lag der Fokus auf Hauptgruppe 3 – Trennen bzw. auf der Gruppe 3.2 – Spanen mit geometrisch bestimmten

Schneiden. Das Werkzeug bzw. Fertigungsmittel bewirkt durch „[...] Relativbewegung gegenüber dem Werkstück unter Energieübertragung die Bildung seiner Form oder die Änderung der Form und Lage [...]“ [DIN-8580]. Werkzeuge mit geometrisch bestimmten Schneiden werden für das Drehen, Bohren, Fräsen, Hobeln, Räumen, Sägen, Feilen, Bürstenspanen und Schaben eingesetzt. Aufgrund der hohen praktischen Relevanz und häufigen Umrüstungen wurden ausschließlich Werkzeuge für Dreh- und Fräsmaschinen betrachtet, die wiederum genormte Werkzeugaufnahmen besitzen. Werkzeugaufnahmen sind Spannvorrichtungen, die den Schneidkörper (z. B. Bohrer oder Fräser) aufnehmen und festhalten und in drei Kategorien eingeteilt werden: Werkzeugaufnahmen mit Morsekegel, mit Steilkegel (SK) und Hohlschaftkegel (HSK). In der Praxis kommen heutzutage überwiegend Werkzeugaufnahmen mit SK und HSK zum Einsatz, die einen schnellen Werkzeugwechsel und hohe Drehzahlen ermöglichen [Bre-2017].

Die Lagerung der Werkzeuge wird im industriellen Einsatz durch unterschiedliche Systeme, wie Kragarm-, Weitspann-, Fachboden- und Palettenregalen sowie Tablar- und Kleinteillager ermöglicht. Für die Lagerung von CNC-Werkzeugen mit geometrisch bestimmten Schneiden haben sich Lagersysteme mit flexibel positionierbaren Lagerplätzen, die exakt auf die genormten Abmessungen der Werkzeugaufnahmen angepasst sind, etabliert. Zur Schaffung von Lagermöglichkeiten in unterschiedlichen Gegebenheiten der Produktionsumgebung werden u. a. Tischaufsatzgestelle oder Werkzeug-schränke und -wagen eingesetzt. In Bezug auf die Kapitel 5 und 6 wurden im Rahmen des Projekts Lagerregale und Tischaufsatzgestelle berücksichtigt. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Lagersysteme ist grundsätzlich gegeben.

Zentraler Aspekt einer Automatisierung der Werkzeuglogistik ist zum einen die Übernahme der Werkzeugtransportprozesse (Abbildung 3-1). Das Projekt AutoWerk fokussierte den Ansatz, den Werkzeugtransport bzw. die Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik durchzuführen. Zum anderen sollen neben Transportprozessen auch Entnahme- und Bestückungsvorgänge automatisiert durch mobile Roboter durchgeführt werden. Dies umfasst die Entnahme und Bestückung von Lagersystemen mit Werkzeugen. Entnahme- und Bestückungstätigkeiten von Werkzeugmaschinen bzw. Werkzeugmaschinenmagazinen erfordern neben Greifprozessen deutlich komplexere Fähigkeiten des Roboters, wie z. B. die Detektion des Maschinenraums zur Kollisionserkennung oder die Durchführung einfacher Tätigkeiten an der Maschine (z. B. Tür auf, Tür zu, Maschinenstart). Die Beschickung von Werkzeugmaschinen wurde im Rahmen des Projekts untersucht. Eine praktische Umsetzung fand jedoch aufgrund des Umfangs nicht statt. Bestandteil des Projekts war jedoch neben der physischen Ausfüh-

zung von Entnahme- und Bestückungsvorgängen von Lagersystemen die dafür notwendige Automatisierung des Informations- und Materialflusses in der Werkzeuglogistik.

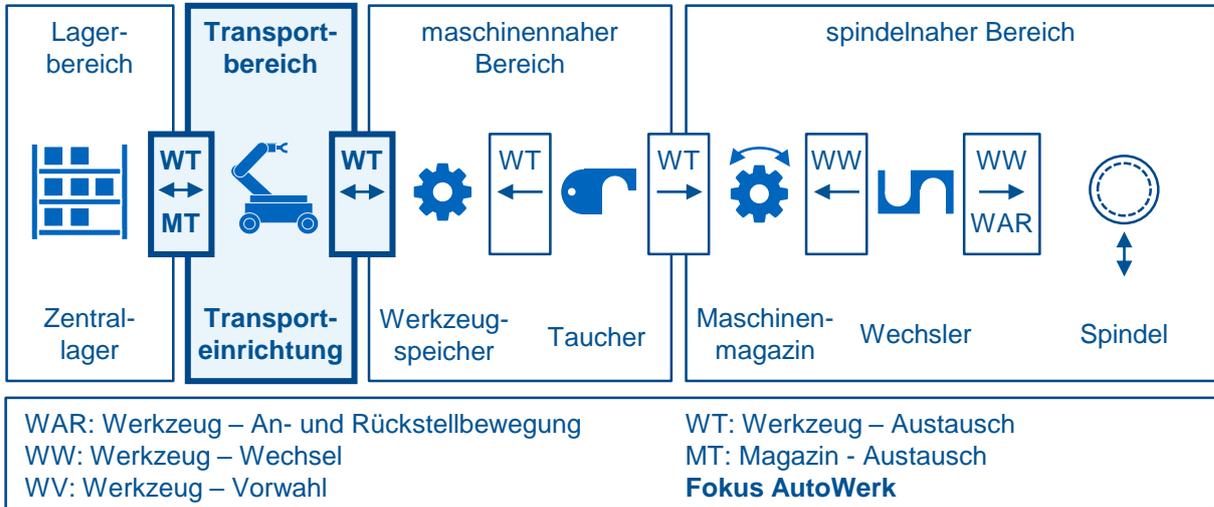


Abbildung 3-1: Einzelkomponenten und Abläufe in einem Werkzeugversorgungssystem (in Anlehnung an [Bre-2017])

Zur Bereitstellung von Werkzeugen müssen den mobilen Robotern außerdem Informationen zu den durchzuführenden Transport- und Handhabungsaufgaben von einer im Projekt zu entwickelnden Planungsinstanz übermittelt werden. Diese berechnet die konkreten Befehle an die Roboter auf Basis der Positionen von Werkzeugen, Maschinen, Lagern und Robotern sowie den eingeplanten Fertigungsaufträgen an den Werkzeugmaschinen. Die Planungsinstanz versucht dabei die Roboter so zu koordinieren, dass diese die Bereitstellungsprozesse möglichst effizient durchführen können. Eine Optimierung der Reihenfolge oder Maschinenzuweisung von Fertigungsaufträgen liegt jedoch außerhalb des Betrachtungshorizonts des Projekts AutoWerk und wird für die Fertigungsaufträge im betrachteten Produktionssystem als bereits durchgeführt angenommen.

Da mobile Roboter eingesetzt werden, um Arbeiten für den Menschen zu verrichten, muss auch bei autonomen mobilen Robotern eine Interaktion mit z. B. Werkkräften erfolgen. Neben automatisierten Prozessen sind weiterhin manuelle Prozesse, wie beispielsweise das Einsetzen von Werkzeugen in die Maschine, zu erledigen und damit eine Interaktion zwischen Mensch und Roboter zu berücksichtigen. Diese Interaktion wird umfangreich betrachtet und wurde letztendlich beispielhaft implementiert (siehe Abschnitt 4.5.3). Das vorrangige Ziel lag darin, die Ansteuerung des Roboters ohne spezifisches Wissen für Werkkräfte zu ermöglichen und dadurch eine Erhöhung der Akzeptanz zu schaffen.

3.2 Einsatzszenarien einer automatisierten Werkzeuglogistik

Mobile Roboter in der Werkzeuglogistik können in einzelnen Automatisierungsstufen eingesetzt werden, um verschiedenen Anforderungen im Hinblick auf technische und finanzielle Rahmenbedingungen zu entsprechen (Abbildung 3-2).

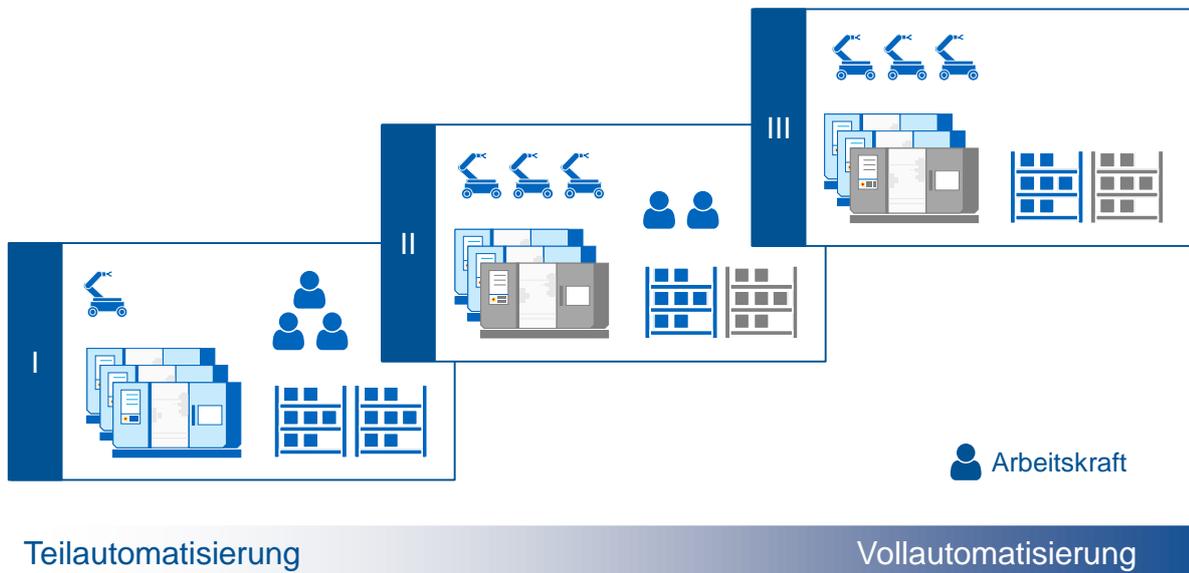


Abbildung 3-2: Stufenmodell der Automatisierung in der Werkzeuglogistik [Här-2019b]

Unter einer Teilautomatisierung (Automatisierungsstufe I) werden im Rahmen des Projekts die unterstützende Versorgung von identischen Werkzeugmaschinen bzw. Werkzeugspeichern und Werkzeuglagern (jeweils Farbe Blau) mittels eines mobilen Roboters verstanden. Durch die Homogenität der Werkzeugaufnahmen sowie die beschränkte Anzahl physischer Schnittstellen ist die Komplexität der Handhabungs- und Transportprozesse vergleichsweise gering. Direkte Maschinenentnahme- und -bestückungsvorgänge werden im Rahmen einer Teilautomatisierung weiterhin von Arbeitskräften durchgeführt. In Automatisierungsstufe I erfolgen auch die Montage, Demontage, Einstellung und Instandhaltung der Werkzeuge manuell.

Zwischen einer Teil- und einer Vollautomatisierung befindet sich Automatisierungsstufe II, welche eine Erweiterung von Automatisierungsstufe I darstellt. Dabei wird die Versorgung von mehreren und unterschiedlichen Werkzeugmaschinen und -lager mittels mehreren mobilen Robotern (Roboteranzahl > 1 ; identische Roboterart) ermöglicht. Die Handhabung ungleichartiger Werkzeugaufnahmen und eine steigende Anzahl verschiedener physischer Schnittstellen führen zu erhöhten Anforderungen an die mobilen Roboter und das Leitsystem. Hierbei ist der Einsatz eines universellen Greifers oder eines Greiferwechselsystems notwendig. Der synchrone und konsistente In-

formations- und Datenaustausch zwischen einer Vielzahl an Teilnehmern und Systemen stellen besondere Herausforderungen für das Leitsystem dar. Anhand geeigneter Algorithmen und auf Basis erfasster Werkzeugbedarfs- und Lokalisationsdaten muss das Leitsystem dynamisch und prädiktiv möglichst effiziente Routen zur Versorgung der Werkzeugmaschinen bzw. -lager ermitteln. Die zweite Ausbaustufe beinhaltet zudem die Ausführung einfacher Montage- und Demontagetätigkeiten von Werkzeugen durch den mobilen Roboter. Komplexe Tätigkeiten, wie z. B. die Bestückung von Maschinenmagazinen, werden weiterhin von Werkskräften übernommen. Eine Entlastung der Arbeitskräfte ist in dieser Automatisierungsstufe bereits deutlich spürbar.

Eine Vollautomatisierung der Werkzeuglogistik (Ausbaustufe III) wird durch die ganzheitliche Übernahme sämtlicher Transport-, Bestückungs- und Entnahmevorgänge sowie Montagetätigkeiten durch mobile Roboter ohne Unterstützung von Arbeitskräften erreicht. Hierbei kann jedoch für spezifische Tätigkeiten, wie z. B. dem Einbau von Wendeschneidplatten oder dem Einstellen von Werkzeugen, eine Zusammenarbeit mobiler Roboter mit dem Menschen in einem Verbund notwendig sein.

3.3 Aufnahme der Ist-Situation in Unternehmen

Ein zentrales Ziel des Forschungsprojekts war die Entwicklung eines industriell einsetzbaren Konzepts, das vor allem die alltäglichen Herausforderungen der Werkzeuglogistik in der Praxis adressiert. Deshalb war über die strukturierte Literaturrecherche zu Grundlagen und aktuellen Forschungsergebnissen im Bereich des Werkzeugwesens in Abschnitt 2.2 hinaus eine Aufnahme des Ist-Zustandes in Unternehmen erforderlich. Ergebnis der Erfassung sollte ein aussagekräftiges Bild der industriellen Praxis innerhalb des in Abschnitt 3.1 definierten Projekthorizonts sein, ohne dabei von Resultaten groß angelegter Umfragen abzuhängen.

Um dies zu erreichen, wurden zunächst Expertengespräche mit Vertretern von Herstellern zerspanender Werkzeuge geführt. Aufgrund der Anzahl und Vielfalt hinsichtlich Unternehmensgröße, Branche und Produktionsstruktur ihrer Kunden verfügen Werkzeughersteller über einen umfassenden Überblick sowohl in Bezug auf typische Umfänge von Werkzeugspektren in kleinen, mittleren und großen Unternehmen als auch bezüglich allgemeiner aktueller Problemstellungen in der Werkzeuglogistik. Die Aussagen decken sich größtenteils mit den Ergebnissen der Literaturrecherche, wonach die durchgängige Digitalisierung eine der zentralen Herausforderungen darstellt. Außerdem wurde eine bessere Einbindung der Dienstleister zur Werkzeugaufbereitung genannt, die sich jedoch außerhalb des Projekthorizonts befindet. Die Anzahl an Werk-

zeugen in einem Unternehmen variieren in Abhängigkeit der Größe der Fertigungsabteilung extrem, wobei die Untergrenze im hohen zweistelligen Bereich und die Obergrenze bei mehreren Zehntausend verortet wurde.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden drei Unternehmen, deren Fertigung dem Betrachtungshorizont des Projekts entspricht, für eine exemplarische Daten- und Prozessaufnahme ausgewählt. Um trotz der geringen Anzahl der Firmen einen repräsentativen Eindruck der industriellen Praxis der Werkzeuglogistik zu gewinnen, wurden Selektionskriterien definiert, anhand derer die Wahl der Unternehmen für die Detailuntersuchung getroffen wurde. Diese sind die Größe des Unternehmens, der vorherrschende Produktionstyp, die Branche und die Position in der Wertschöpfungskette. Die Einordnung der ausgewählten Unternehmen hinsichtlich dieser Kriterien ist in Tabelle 3-1 visualisiert.

Tabelle 3-1: Selektionskriterien für Unternehmen zur Prozessaufnahme

Unternehmensgröße	KMU		Großunternehmen
Produktionstyp	Einzelfertigung	Kleinserienfertigung	Großserienfertigung
Branche	Leichtbau	Maschinen- und Anlagenbau	Automobilindustrie
Position in Supply Chain	Zulieferer		Endproduzent

 Unternehmen 1
 Unternehmen 2
 Unternehmen 3

Im Vorfeld der Prozessaufnahmen wurde ein Fragenkatalog als Leitfaden für die Datenerfassung entworfen. Dieser gliedert sich in die Bereiche Technik, Organisation und Aufträge. Die Fragen im Bereich Technik zielen auf technische Details der Werkzeuge, Werkzeugmaschinen und Prozesse zur Werkzeugvor- und -nachbereitung ab. Unter dem Punkt Organisation werden Informationen zu Randbedingungen der Fertigung, Werkzeuglagerung sowie die Anzahl an Werkzeugtypen, Schwesterwerkzeugen eines Typs und anderer Werkzeugkomponenten erfasst. Die Diversität, Losgröße und Anforderungen an Werkzeuge von Fertigungsaufträgen ist Gegenstand des dritten Ab-

schnitts des Fragebogens. Auf Grundlage des Fragebogens wurden in den drei ausgewählten Unternehmen vor Ort detaillierte Daten- und Prozessaufnahmen durchgeführt und anschließend aufbereitet und in Flussdiagrammen modelliert.

Die Ergebnisse der Detailuntersuchungen bestätigen die bisherigen Erkenntnisse weitestgehend. Die Prozesse der Werkzeuglogistik laufen in allen drei betrachteten Unternehmen prinzipiell sehr ähnlich zum in Abschnitt 2.1.1 beschriebenen Vorgehen ab, auch wenn sie sich aufgrund der großen Unterschiede sowohl der Anzahl der Maschinen als auch der Anzahl der Werkzeuge in ihrem Umfang stark unterscheiden. Eine Abweichung zwischen den Unternehmen lässt sich jedoch in der Art der Werkzeuglagerung feststellen. Während im Vertreter der KMU alle Werkzeuge zentral gelagert und auftragspezifisch kommissioniert werden, sind die meisten Werkzeuge in den beiden Großunternehmen dezentral maschinenspezifisch gelagert. Lediglich selten benötigte Spezialwerkzeuge und Ersatzwerkzeuge befinden sich im zentralen Werkzeuglager. Allgemein äußerten allen Unternehmen, die im Rahmen einer Prozessaufnahme untersucht wurden, ein ausgeprägtes Interesse an Lösungen zur Automatisierung und durchgängigen Vernetzung der Werkzeuglogistik und zeigten sich offen für den Einsatz mobiler Roboter zu diesem Zweck. Ein weiteres Ergebnis der Prozessaufnahmen ist die Erkenntnis, dass eine Eingrenzung des Projekthorizonts über die in Abschnitt 3.1 genannten Punkte erfolgen muss. Die Diversität spanender Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide sowie deren Werkzeugaufnahmen übersteigen die technischen Möglichkeiten einer demonstratorischen Umsetzung einer automatisierten Werkzeuglogistik, wie sie im Projekt erfolgen soll, bei Weitem. Dementsprechend wurden im weiteren Projektverlauf nur Werkzeugaufnahmen der Typen Morsekegel, Steilkegel (SK) und Hohlschaftkegel (HSK) sowie Gesamtwerkzeuge mit einem Gewicht von weniger als 6 kg betrachtet.

3.4 Anforderungen an das Gesamtsystem

Die angewandte Vorgehensweise zur Anforderungsanalyse an das Gesamtsystem basiert auf der von McMenamin und Palmer entwickelnden „Essenziellen Systemanalyse“ [McM-1988] welche eine Weiterentwicklung der „Strukturierten Systemanalyse“ von DeMarco ist [DeM-1979]. Als Essenz eines Systems wird dabei die vollständige Menge wahrer Anforderung an das System bezeichnet. Wahre Anforderungen entsprechen dabei Eigenschaften oder Fähigkeiten, die das System haben muss, unabhängig davon, wie das System später umgesetzt wird. Die Inkarnation eines Systems ist hingegen die Gesamtheit aller Elemente, welche benutzt werden, um die Essenz eines Systems zu realisieren [McM-1988].

3.4.1 Anforderungsanalyse Robotersystem

Im gesamten Entwicklungsprozess muss nicht nur ein Verständnis über das zu entwickelnde Gesamtsystem, sondern auch über den Systemkontext herrschen. Oftmals sind Einflüsse unbekannt, die sich auf verschiedene Teilbereiche auswirken. Im Folgenden werden zunächst relevante Aspekte und deren Einflüsse auf das gesamte Robotersystem erläutert.

Arbeitsumgebung: Einer der Hauptaspekte ist, dass die Arbeitsumgebung, in welcher das System in Zukunft eingesetzt werden soll, von Kunde zu Kunde sehr variieren kann. Im Allgemeinen besteht die Arbeitsumgebung aus Werkzeugmaschinen, Werkzeuglagern und Werkzeugen unterschiedlicher Ausprägung und Anordnung. Die räumlichen Gegebenheiten können dabei erheblichen Einfluss auf einzelne Funktionalitäten des Roboters haben. Dazu kommen bereits etablierte Prozesse und die bestehende IT-Infrastruktur.

Werkzeugmaschinen: Die WZM agieren als physische Schnittstellen zum Roboter, können aber keinen grundlegenden konstruktiven Änderungen unterzogen werden. Die Vielfalt in diesem Segment durch unterschiedlichste Abmessungen, Bauformen und Handhabungstechniken ist zudem ein großer Komplexitätstreiber für die Interaktion des Roboters in und mit der Maschine. Außerdem müssen auch Kommunikationsschnittstellen zwischen Maschine und Roboter bzw. Leitsystem geschaffen werden.

Werkzeuge: Die Art der Werkzeuge bzw. der Werkzeugaufnahmen ist durch die Werkzeugmaschinen festgelegt. Theoretisch ist es möglich, Anpassungen an Werkzeugaufnahmen vorzunehmen, wenn dadurch keine Qualitätsverluste einhergehen. Bei WZ wäre auch eine Neubeschaffung denkbar. Außerdem haben die Werkzeuge einen hohen Einfluss auf die Gestaltung des Endeffektors.

Werkzeuglager: Ein weiterer Aspekt sind die Werkzeuglager, die ebenfalls wie WZM als physische Schnittstellen zum mobilen Roboter agieren. Die Schwierigkeiten finden sich hier jedoch beim Definieren von geeigneten Übergabepunkten und eine sinnvolle Anordnung der Lagerplätze.

Bestehende IT-Infrastruktur: Je nach Unternehmen kommen verschiedene IT-Systeme mit abweichenden Funktionalitäten zum Einsatz. Entscheidend sind jedoch vor allem Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme (PPS). Die Planung und Steuerung umfasst u. a. die Zuordnung von Aufträgen zu verfügbaren mobilen Robotern. Durch die dadurch entstehende Dynamik müssen PPS-Systeme befähigt werden, diese Ressourcen in die Planung und Steuerung miteinzubeziehen.

Datenbanken: Datenbanken gehören ebenfalls zur IT-Infrastruktur, werden jedoch extra gelistet, weil diese je nach Unternehmen unterschiedlichste Ausprägungen und Inhalte aufweisen können. Aktuell werden neben den Werkzeugbeständen lediglich Werkzeugdaten aus der Vermessung sowie ungefähre Lokalisationsdaten, die nur eine Station betreffen, gespeichert. Für die Identifizierung und Handhabung der Werkzeuge durch den Roboter müssen diesem jedoch der eindeutige Lagerplatz eines Werkzeugs in einer Station sowie die kompletten geometrischen Abmessungen, z. B. in Form von CAD-Daten, vorliegen. Zum einen müssen also Daten konkretisiert oder um Datentypen erweitert werden, zum anderen müssen, wie am PPS-System erläutert, gänzlich neue Daten erzeugt werden.

Prozesse: Der grundlegende Prozess, der aktuell in einem Großteil der Unternehmen für den Werkzeugkreislauf vorherrscht, ist in Abschnitt 2.1.1 erläutert. Jedoch ist auch dieser in jedem Unternehmen speziell auf die individuellen Bedürfnisse angepasst. Ebenso kann sich ein bestehender vorgelagerter Prozess auf die Verfügbarkeit von Daten auswirken, was die Planung des Leitsystems erschwert. Somit nimmt dieser Bereich ebenfalls vorrangig Einfluss auf das Leitsystem und dessen Flexibilität sowie Robustheit.

Anwender: Als Anwender wird der Personenkreis in Unternehmen genannt, die das (Gesamt-)System in Betrieb nehmen und betreuen, sowie die Werkskräfte, welche mit dem Roboter in Kontakt kommen. Für diesen Kreis spielt vorrangig die intuitive Bedienung und Implementierung, sowie der Umfang der Funktionen des Systems eine Rolle.

Akzeptanz: Damit eine Automatisierung der Werkzeuglogistik zu einer Produktivitätssteigerung beiträgt, muss das Gesamtsystem von den Anwendern bedarfsgerecht benutzt werden. Um dies zu erreichen, muss das System eine ganzheitliche Akzeptanz erfahren. Wichtig für die Akzeptanz ist es, dass die Anwender zum einen den Mehrwert des Systems verstehen und den Roboter nicht als Konkurrenten, sondern als Unterstützer betrachten. Zum anderen muss den Werkskräften der genaue Aufgabenbereich, die Bewegungsabläufe und die Sicherheitseinrichtungen des mobilen Roboters erläutert und demonstriert werden, um Ängste gegenüber diesen abzubauen.

Sicherheit: Neben der Akzeptanz ist auch die Sicherheit des Systems als ein wichtiger Faktor zu berücksichtigenden. Dies betrifft nicht nur die explizite Interaktion des Roboters mit Menschen, Maschinen, Lagern und den Transport, sondern den generellen Betrieb des Systems von der Inbetriebnahme bis zur Stilllegung. In Europa regelt das die Richtlinie 2009/104/EG und ist in Deutschland durch die Betriebssicherheitsverordnung umgesetzt.

Normen: Die Berücksichtigung und Einhaltung von Normen oder VDI-Richtlinien steigert ebenfalls die Akzeptanz, da diese nach Definition „Anerkannte Regeln der Technik“ sind, die Gefährdungen kontrollieren können. Zusätzlich erleichtern sie die technische und kommunikative Zusammenarbeit, da Normen Fachbegriffe festlegen und die Kompatibilität von Systemen fördern.

Zertifizierung: Wie bereits im Punkt Sicherheit erwähnt, sind auch nationale und internationale Gesetze zu beachten, um für Produkte eine Zulassung und einen Marktzugang zu erhalten. Gesetze können dabei von der Regierung erarbeitet worden sein, aber auch auf Normen verweisen, die damit von einer Empfehlung zur Verbindlichkeit werden. Geprüft und zertifiziert wird die Einhaltung der Gesetze und Richtlinien durch unabhängige, akkreditierte Zertifizierungsstellen. Eine Zertifizierung umfasst dabei häufig mehr als nur die gesetzlichen Mindestanforderungen, was die Außenwirkung einer Zertifizierung positiv beeinflusst.

Wie von der essenziellen Systemanalyse gefordert, werden die Anforderungen im Folgenden allgemein gehalten, also das „Was“ des Systems beschrieben. Die Anforderungen geben jedoch bereits Hinweise auf die spätere Umsetzung, das „Wie“. In Kapitel 5 und 6 ist die Umsetzung und Integration explizit erläutert.

Die zentralen technischen Anforderungen an das Robotergesamtsystem lassen sich zunächst in vier Kontextfacetten, „Referenzieren an Übergabestationen“, „Identifikation von Werkzeugen“, „Kollisionsloses Greifen von Werkzeugen“ und „Kollisionsloses Setzen von Werkzeugen“ unterteilen (Abbildung 3-3), die nachfolgend detailliert beschrieben sind.

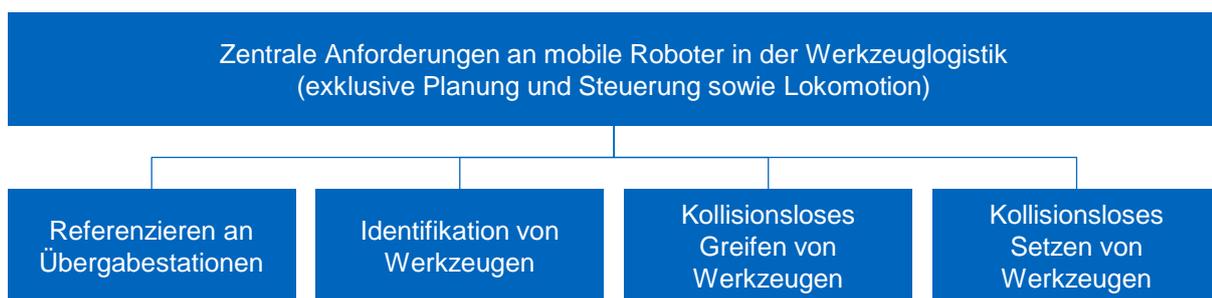


Abbildung 3-3: Zentrale Anforderungen an mobile Roboter in der Werkzeuglogistik

Hierbei werden ausschließlich funktionale Anforderungen und keine Qualitätsanforderungen aufgeführt. Jede der vier zentralen Anforderungen bzw. deren Abhängigkeiten untereinander erhalten eine ID-Nummer und eine Kurzbeschreibung.

Für das **Referenzieren an Übergabestationen** wird gefordert, dass das System ein eindeutiges Referenzieren des mobilen Roboters an Übergabestationen ermöglichen muss. Daraus ergeben sich laut Abbildung 3-4 weitere Anforderungen, die wiederum Abhängigkeiten zwischen Roboter und Übergabestation hervorrufen.

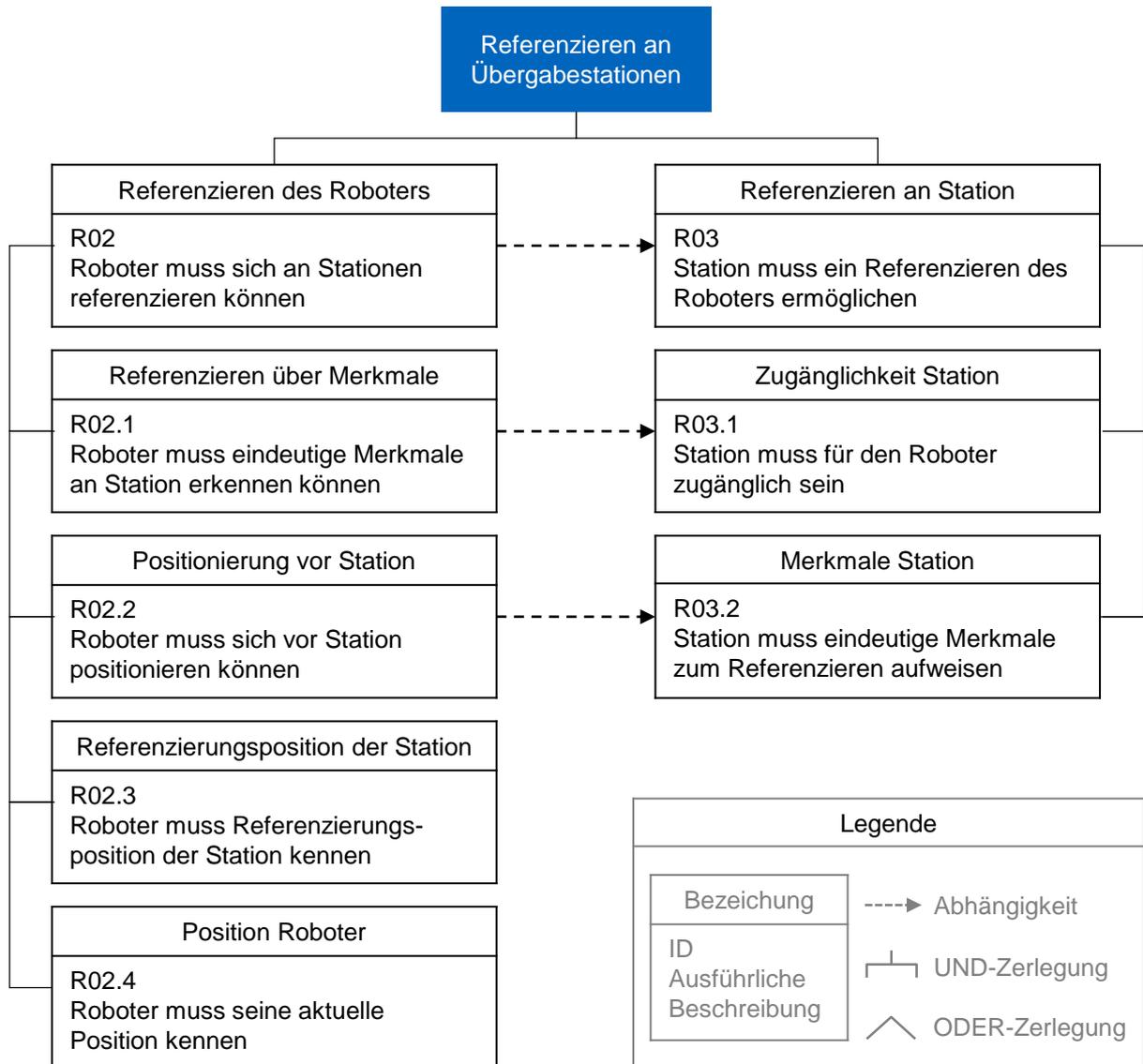
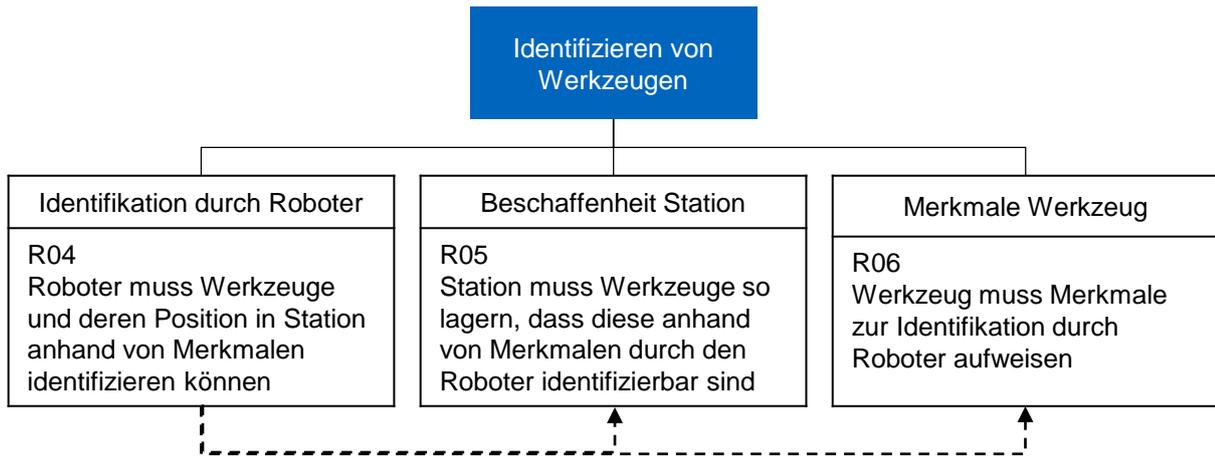
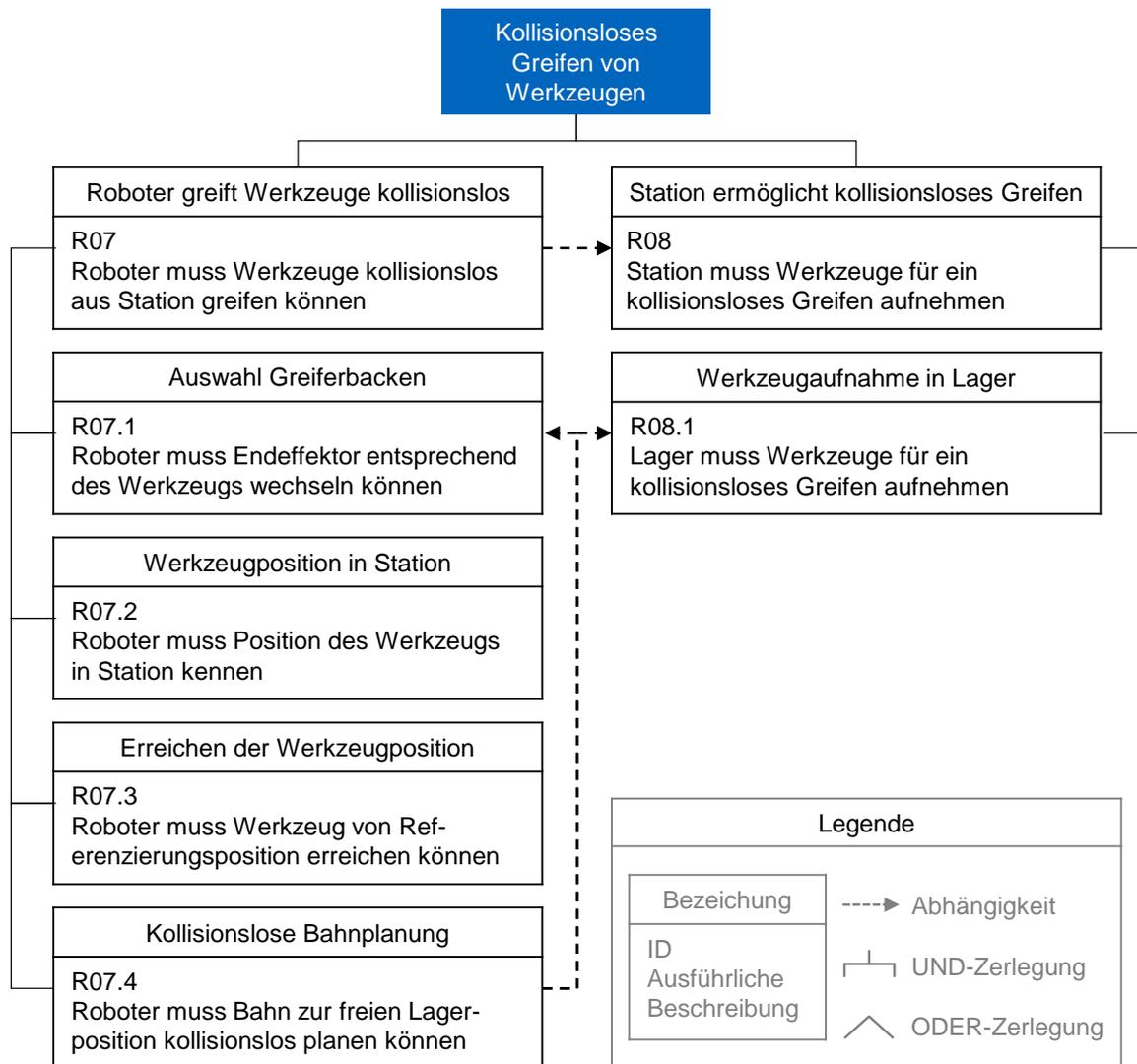


Abbildung 3-4: Referenzieren an Übergabestationen

Um eine unverwechselbare **Identifikation von Werkzeugen** zu ermöglichen, muss der Roboter Werkzeuge in der Station identifizieren können. Die Station und das Werkzeug müssen hierfür die entsprechende Beschaffenheit aufweisen (Abbildung 3-5).



Das **Kollisionslose Greifen und Setzen von Werkzeugen** weisen zum Teil ähnliche Anforderungen auf (Abbildung 3-6, Abbildung 3-7).



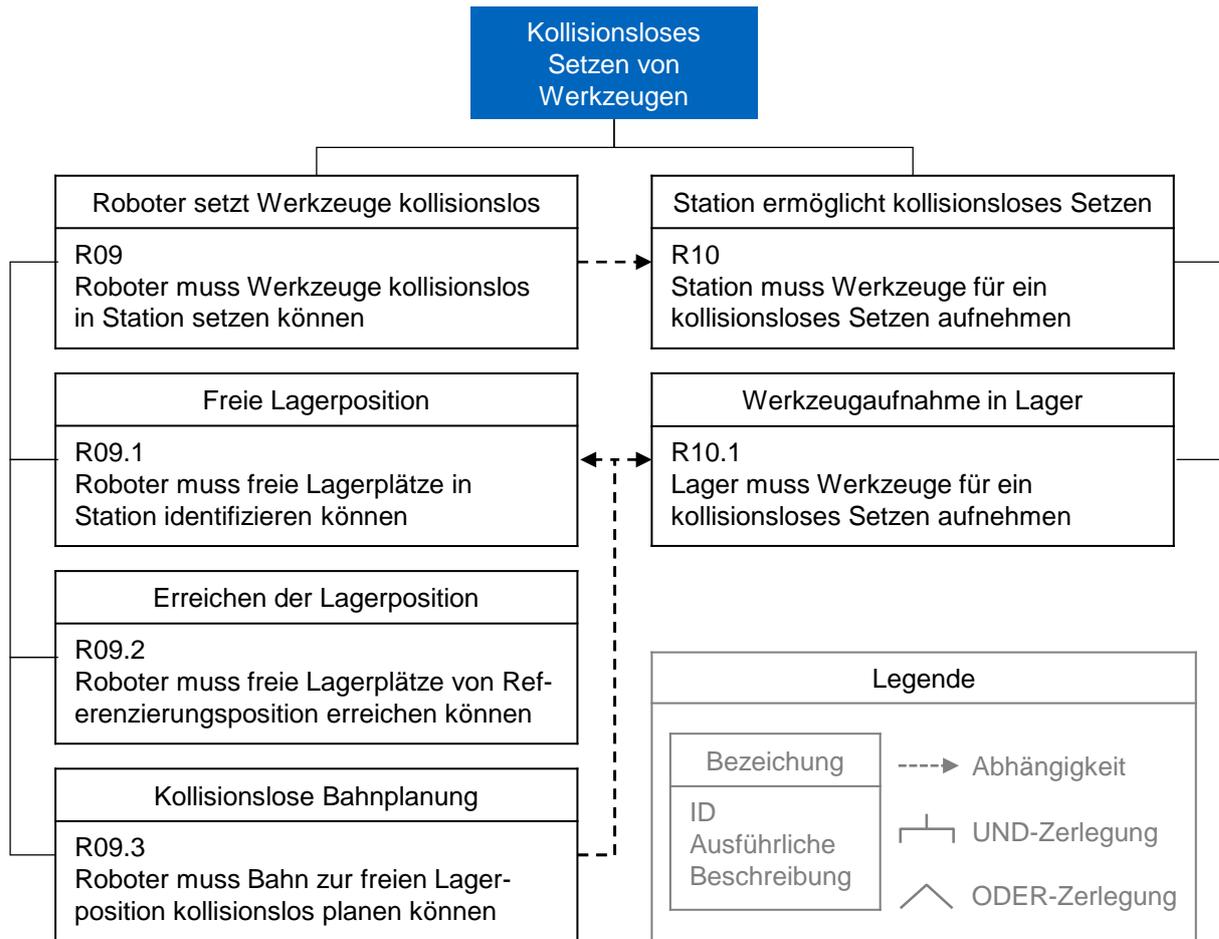


Abbildung 3-7: Kollisionsloses Setzen von Werkzeugen

Zu den zentralen Anforderungen an mobile Roboter in der Werkzeuglogistik zählen auch **Kommunikationsschnittstellen** (Abbildung 3-8). Zum einen muss der mobile Roboter systemintern und -extern kommunizieren können. Die interne Kommunikation muss bidirektional mit dem Leitsystem stattfinden, um Aufträge entgegennehmen zu können und die Ausführung zu bestätigen. Zum anderen ist eine bidirektionale Kommunikationsschnittstelle zu Werkskräften und eine unidirektionale Schnittstelle zur Umgebung notwendig (siehe Anwender und Akzeptanz).

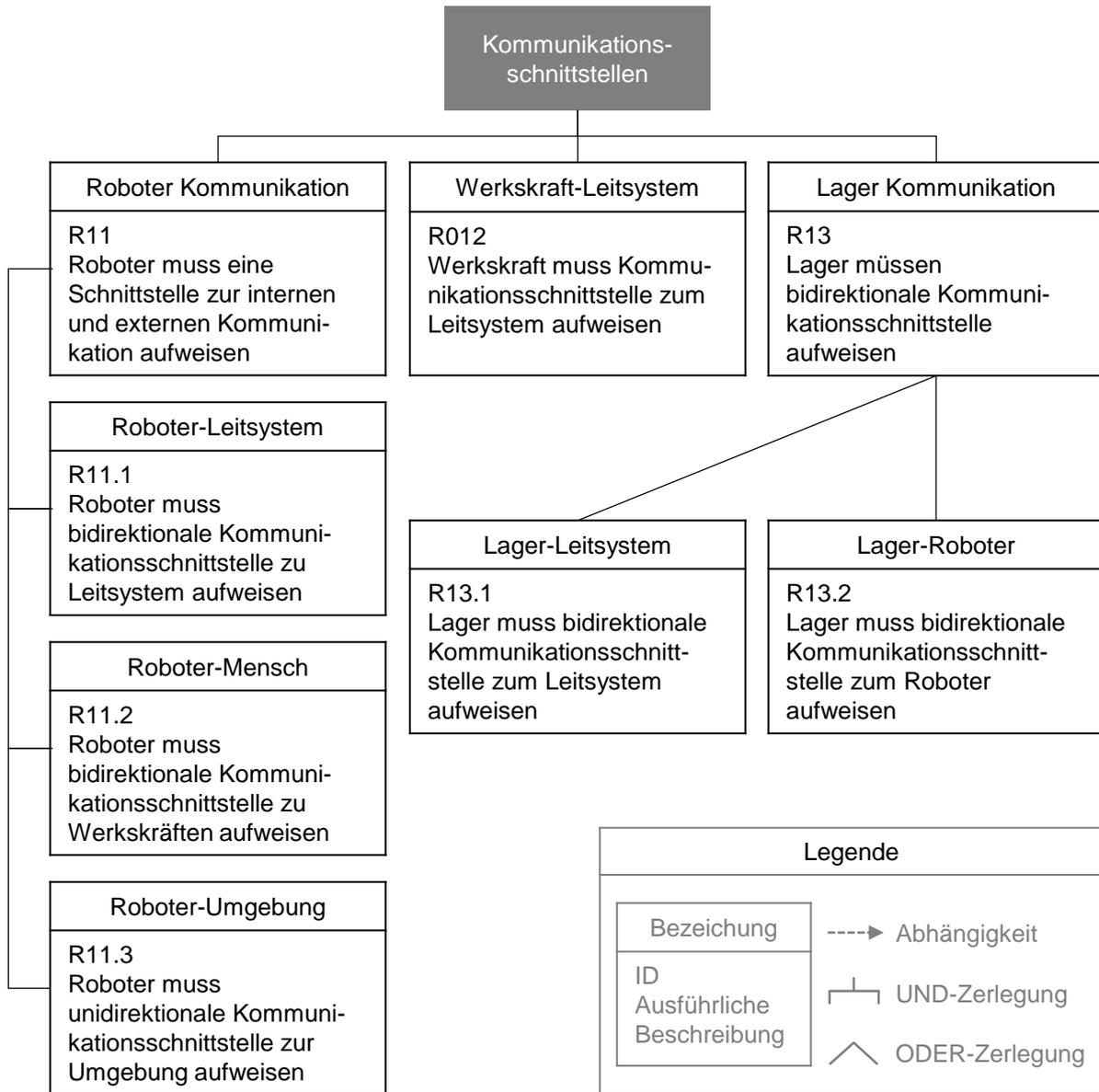


Abbildung 3-8: Kommunikationsschnittstellen

3.4.2 Anforderungsanalyse Planung und Steuerung

Die zentrale Aufgabenstellung der Werkzeuglogistik ist es, wie in Abschnitt 2.1.3 vorgestellt, zu gewährleisten, dass stets das richtige Werkzeug zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort bereitgestellt wird. Diese Gesamtaufgabe lässt sich in vier Teilprobleme zerlegen, die durch die Planung und Steuerung der automatisierten Werkzeuglogistik gelöst werden müssen:

- Die Erfassung von Planungsdaten
- Die Verarbeitung von Planungsdaten
- Die Übertragung von Steuerungsbefehlen
- Die operative Durchführung von Steuerungsbefehlen

Anhand dieser Teilaufgaben lassen sich für die Planung und Steuerung der automatisierten Werkzeuglogistik die folgenden Anforderungen ableiten:

Erfassung von Planungsdaten: Zur Beantwortung ihrer grundlegenden Fragestellung ist die Werkzeuglogistik zu einem großen Ausmaß von Informationen der Produktionsplanung und -steuerung abhängig. Die PPS legt fest, wann welche Produktionsaufträge auf welcher Produktionsressource durchgeführt werden, und stellt dadurch die maßgebliche Ausgangsbasis für die Werkzeugeinsatzplanung dar [Sch-2012]. Aus diesem Grund ist es eine zentrale Anforderung an die Planung der automatisierten Werkzeuglogistik, die Planungsdaten der PPS sowie Lokationsdaten von Werkzeugen, Robotern, Werkzeugmaschinen und -lagern zu erfassen. Um diese Anforderung zu erfüllen, müssen Kommunikationskanäle zu bestehenden IT-Systemen, Robotern und Werkskräften existieren. Darüber hinaus müssen die Daten strukturiert gespeichert und wieder abgerufen werden können. Eine weitere Anforderung an die Erfassung von Planungsdaten ist die regelmäßige Überprüfung der gespeicherten Daten auf Aktualität.

Verarbeitung von Planungsdaten: Für die Verarbeitung von Planungsdaten müssen zwei zentrale Anforderungen erfüllt werden. Erstens müssen aus den eingelesenen Fertigungsaufträge Bedarfsdaten ermittelt und gespeichert werden. Zweitens müssen diese Bedarfe zu Transportaufträgen kombiniert werden. Hierzu ist wiederum die Implementierung von Algorithmen zur Tourenbildung erforderlich, die eine effiziente Transportauftragserstellung und deren Auslösung zulassen. Weiterhin müssen die Daten der Transportaufträge zu Steuerungsbefehlen, die von den Robotern interpretiert werden können, verarbeitet und gespeichert werden.

Übertragung von Steuerungsbefehlen: Eine weitere Anforderung an das Leitsystem ist die Übertragung von Steuerungsbefehle an die Roboter. Dazu muss ein geeignetes Kommunikationssystem eingerichtet werden, über das die Planungsinstanz mit den Robotern drahtlos, störungsfrei und sicher Informationen austauschen kann. Dieses muss zudem mit bestehenden Kommunikationssystemen innerhalb des Produktionssystems koexistieren können.

Operative Durchführung von Steuerungsbefehlen: Die Anforderungen an die operative Durchführung von Steuerungsbefehlen sind größtenteils bereits den Anforderungen an das Robotersystem in Abschnitt 3.4.1 aufgeführt. Über diese hinaus muss das Robotersystem in der Lage sein, sich selbständig zu lokalisieren und zwischen vorgegebenen Stationen wie Werkzeugmaschinen oder Werkzeuglagern zu navigieren sowie der Planungsinstanz Rückmeldungen zur Ausführung einzelner Befehle zu übermitteln.

Im Zuge der Anforderungsanalyse wurden zur vollständigen Erfassung aller möglichen Lösungen morphologische Kästen für das Gesamtsystem erarbeitet (siehe 7.3.3Anhang A). Das Ziel dabei ist die Veranschaulichung und Auswahl eines theoretisch „perfekten Roboter-Gesamtsystems“ zur Automatisierung der Werkzeuglogistik. Die unterschiedlichen Merkmale und Ausprägungen wurden auf Basis von Literaturrecherchen und Experteninterview aufgestellt. Insgesamt wurden sieben Hauptmerkmale identifiziert: mobiler Roboter, Endeffektor, Leitsystem, Lagersystem, Maschine, Werkzeugaufbereitung und Umwelt. Nach Erstellung der Einzelmerkmale und deren Ausprägungen erfolgte anhand der Automatisierungsstufen bzw. einer Vollautomatisierung (siehe Abbildung 3-2) die Bewertung hinsichtlich einer optimalen Konstellation.

3.5 A priori Wirtschaftlichkeitsbewertung

Um die aufgestellten Anwendungsfälle bereits zu einem frühen Stadium, bevor eine detaillierte Ausplanung existiert, hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit zu bewerten, wurde eine Methode zur a priori Wirtschaftlichkeitsabschätzung entwickelt. Das Ziel der Methode im Projektkontext ist es, auf Basis ausgewählter Kennzahlen der Werkzeuglogistik und mobiler Roboter unter Aufstellung plausibler Annahmen möglichst früh die Wirtschaftlichkeit der aufgestellten Anwendungsfälle grob zu bewerten. Somit kann die Methode erste Hinweise auf die Relevanz der Einsatzszenarien für die industrielle Praxis liefern und gegebenenfalls eine Anpassung oder Überarbeitung der Szenarien nahelegen. Gleichzeitig bietet die Methode – durch die Projektergebnisse verfeinert – auch über die Projektlaufzeit hinaus einen Mehrwert für Unternehmen. So können Firmen, die Überlegungen zur Automatisierung der Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik anstellen, aufwandsarm eine erste Abschätzung der Wirtschaftlichkeit dieser Lösung treffen und auf dieser Grundlage informierte Entscheidungen über das weitere Vorgehen treffen. [Ras-2019]

Entsprechend dieser Anforderungen basiert die Methode auf einem hierarchischen Kennzahlensystem, an dessen Spitze der Kapitalwert der automatisierten Werkzeuglogistik steht. Dieser kann stellvertretend für die Vorteilhaftigkeit eines Projekts interpretiert werden, wobei der zu erwartende Nutzen eines Projekts mit der Höhe des Kapitalwerts steigt. Ergibt sich ein negativer Kapitalwert, ist das Projekt als verlustbringend zu bewerten. Trotz einiger Schwächen des Kapitalwerts als alleiniges Entscheidungskriteriums für oder gegen eine Investition, wie beispielsweise einer Abhängigkeit von einem nicht exakt bestimmbareren Kalkulationszinssatz, ist die Kapitalwertmethode für den vorliegenden Anwendungsfall die Investitionsrechnungsmethode der Wahl [Sch-2017a]. Dies ist zum einen in ihrer einfachen Anwendbarkeit begründet.

Zum anderen berücksichtigt sie als dynamische Investitionsrechnungsmethode die Lebensdauer der mobilen Roboter. Auf diese Weise liefert die a priori Wirtschaftlichkeitsabschätzung für den teilautomatisierten Fall, in dem nur Transportvorgänge automatisiert werden, und für den vollautomatisierten Fall, in dem sowohl Transport- als auch Handhabungsprozesse von mobilen Robotern ausgeführt werden, eine Umsetzungsempfehlung. Da sich der Kapitalwert aus der Summe der prognostizierten Ein- und Auszahlungen über die Laufzeit der Investition berechnet, müssen sich diese anhand des Kennzahlensystems berechnen lassen [Sch-2017a]. Die Auszahlungen setzen sich aus den initialen Kosten für einen mobilen Roboter, die Anzahl an benötigten Robotern sowie deren laufenden Kosten zusammen, wie Abbildung 3-9 zeigt. Als Einzahlungen werden im Sinne der Investitionsrechnung die eingesparten Lohnkosten im Falle einer Automatisierung der Werkzeuglogistik betrachtet.

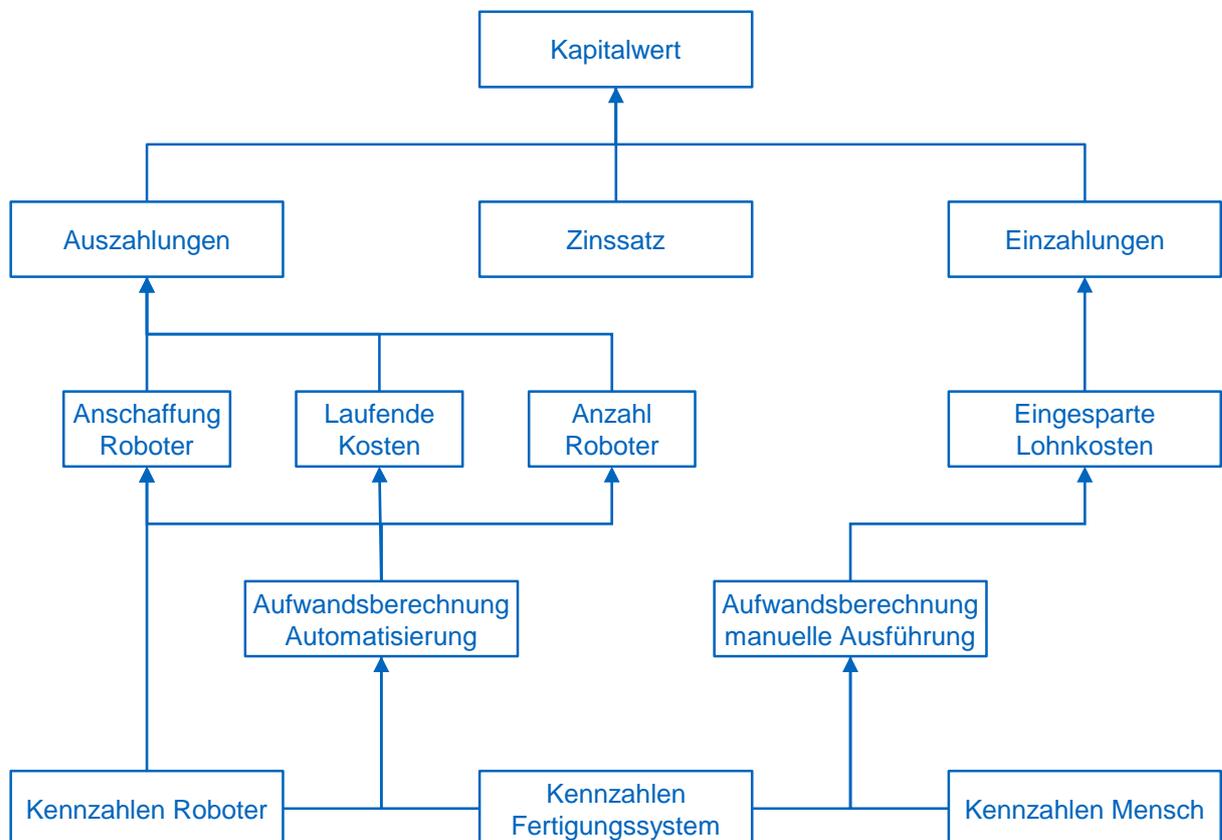


Abbildung 3-9: Hierarchie des Kennzahlensystems zur a priori Wirtschaftlichkeitsbewertung

Zur Berechnung sowohl der Ein- als auch der Auszahlungen muss für den manuellen, teilautomatisierten und vollautomatisierten Fall eine Abschätzung des zeitlichen Aufwands für die Prozesse der Werkzeuglogistik von Mensch und Roboter durchgeführt werden. Diese erfolgt auf Grundlage von Kennzahlen zu Menschen, wie die Anzahl an für die Werkzeugbereitstellung zuständige Werkskräften, deren Personalkosten und

Wochenarbeitszeit, Kennzahlen zu Robotern, wie Anschaffungskosten, Softwarekosten, Transportkapazität, Ladezeit und Abschreibungszeitraum, und Kennzahlen des Fertigungssystems, wie Anzahl der Betriebstage pro Jahr, Schichten pro Tag, Anzahl an Bereitstellungsprozessen pro Schicht und durchschnittliche Transportwege. Für die Aufwandsabschätzung wurden unter anderem die Annahmen getroffen, dass die zeitliche Verteilung der Bereitstellprozesse homogen ist und keine Routenoptimierung für die mobilen Roboter existiert.

Um der Anforderung an eine unkomplizierte Anwendung der Berechnung als Hilfestellung für Unternehmen zur Entscheidung über eine Automatisierung der Werkzeuglogistik gerecht zu werden, wurde die Methode als browserbasierte Applikation implementiert. Sie kann somit ohne separate Installation genutzt werden. Damit die Benutzeroberfläche so übersichtlich wie möglich gestaltet ist, werden sämtliche Berechnungen unsichtbar für den Benutzer im Back-End der Applikation durchgeführt. Die Benutzeroberfläche besteht aus einer Eingabemaske mit den drei oben genannten Bereichen, Mensch, Roboter und Fertigungssystem, zur Erfassung der Kennzahlen. Durch Betätigung einer Bestätigungsschaltfläche werden die Kapitalwerte für den teil- und vollautomatisierten Fall am Ende des Abschreibungszeitraums angezeigt. Darüber hinaus bietet die Applikation eine Reihe von Visualisierungen. Dazu zählen beispielsweise die Darstellung des Einflusses von Änderungen der Schichtanzahl oder der Anzahl an Werkzeugwechseln auf den zeitlichen Verlauf des Kapitalwerts anhand von Graphen, wie der Ausschnitt aus der Benutzeroberfläche in Abbildung 3-10 zeigt.

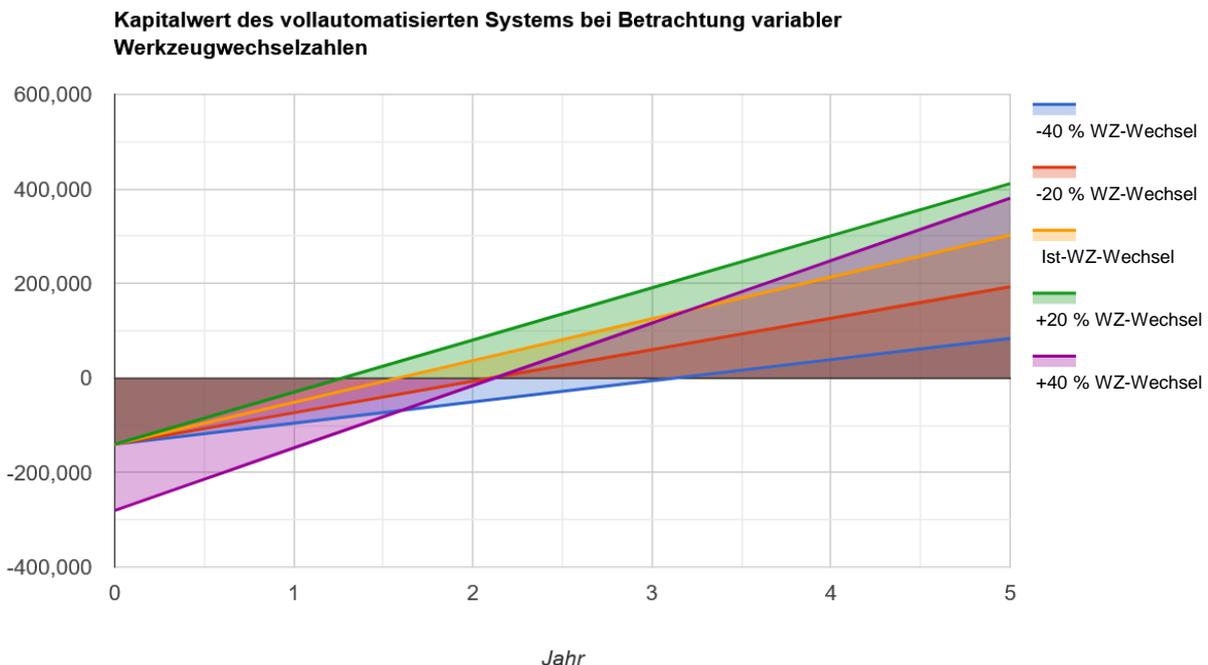


Abbildung 3-10: Visualisierung des Kapitalwerts in der browserbasierten Applikation

Die Methode zur Wirtschaftlichkeitsabschätzung ermittelte anhand der Daten aus den Prozessaufnahmen (siehe Abschnitt 3.3) für den vollautomatisierten Fall für alle drei Unternehmen einen positiven Kapitalwert. Betrachtet man im Vergleich dazu den Kapitalwert im teilautomatisierten Fall, wird dieser erst ab erheblich größeren Fertigungsbereichen positiv. Da in diesem Szenario lediglich die Transportprozesse von mobilen Robotern durchgeführt werden, sind für eine wirtschaftliche Rentabilität der Umsetzung entsprechend größere Transportstrecken und -volumina zu bewältigen. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsabschätzung die Relevanz der in Abschnitt 3.2 definierten Anwendungsfälle. Dementsprechend wurde im weiteren Projektverlauf sowohl die Konzeptionierung der Planung und Steuerung als auch die der steuerungstechnischen und physischen Schnittstellen an Übergabepunkten auf Basis dieser Einsatzszenarien durchgeführt.

4 Planung und Steuerung der automatisierten Werkzeuglogistik

Verfasser: Florian Ried, Anja Miller

Der Blick auf Automatisierung im Allgemeinen und die Automatisierung der Werkzeuglogistik im Speziellen darf nicht alleine auf die selbständige physische Durchführung von Prozessen durch Maschinen beziehungsweise Roboter reduziert werden. Die für das menschliche Auge unsichtbare automatisierte Planung und Steuerung dieser Prozesse nimmt für deren Funktionsfähigkeit eine mindestens ebenso große Rolle ein. In diesem Kapitel wird die Entwicklung der Planung und Steuerung der automatisierten Werkzeuglogistik im Projekt AutoWerk vorgestellt. Es beginnt mit der Definition der Aufgaben der Planung und Steuerung, worauf die Konzeptionierung der Prozesskette sowie der Softwarearchitektur folgt. Den Abschluss des Kapitels bildet eine Betrachtung der Implementierung und Verifikation und Validierung der Systembestandteile.

4.1 Konzeptionierung der Planung und Steuerung

Für die Aufgabenverteilung der Planung und Steuerung der automatisierten Werkzeuglogistik wurde im Forschungsprojekt AutoWerk ein hybrides Konzept gewählt. Dabei wird die Planung der Werkzeuglogistik zentral durchgeführt, wohingegen die operative Steuerung dezentral durch die mobilen Roboter erfolgt, wie Abbildung 4-1 skizziert. Durch diese Aufgabenteilung komplementieren sich die Vorteile von zentralen und dezentralen Steuerungsstrategien, während die jeweiligen Nachteile größtenteils nicht zum Tragen kommen. Ein Leitsystem als zentrale Planungsinstanz, das im Wesentlichen die Erfassung von Planungsdaten, deren Verarbeitung und Übermittlung an die mobilen Roboter übernimmt, vereint jederzeit einen aktuellen Überblick über das betrachtete Gesamtsystem in sich. Dadurch, dass es über sämtliche Planungsdaten verfügt, kann bei der Erstellung von Transportaufträgen und der Koordination der Roboter eine höhere Effizienz und Qualität sowie ein vorhersagbares Systemverhalten erzielt werden [Gon-2017]. Außerdem reduziert eine zentrale Planung den enormen Kommunikationsbedarf zwischen den Robotern, der für eine dezentrale Lösung erforderlich wäre. Die dezentrale Steuerung der mobilen Roboter, die neben der Lokalisierung und Navigation auch die Steuerung der Handhabungsprozesse des Manipulators übernimmt, hilft einerseits dabei, die Komplexität der zentralen Planung zu reduzieren. Andererseits ermöglicht sie durch die dezentrale Entscheidungsfindung eine höhere Flexibilität gegenüber kurzfristiger und vorübergehender Änderungen der Umgebung,

wie dem Blockieren von Wegen. Der einzige schwerwiegende Nachteil, der durch das hybride Konzept nicht eliminiert werden kann, ist die fehlende Redundanz der zentralen Planung als Single Point of Failure [Sch-2020].

Zentrale Planung durch Leitsystem

- Bedarfsermittlung
- Berechnung von Transportaufträgen
- Kommunikation mit Robotern und IT-Infrastruktur

Dezentrale Steuerung durch Roboter

- Lokalisierung & Navigation
- Steuerung Manipulator
- Quittieren von Aufträgen

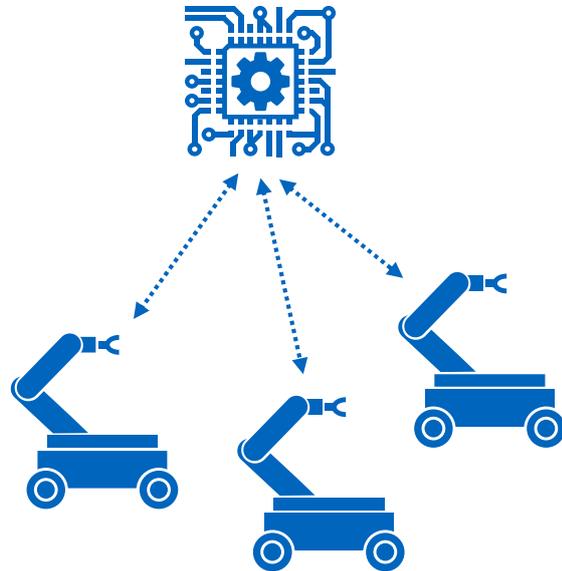


Abbildung 4-1: Hybride Verteilung von Planung und Steuerung im Projekt AutoWerk

Darüber hinaus lässt sich das Leitsystem durch die Entkopplung von der operativen Steuerung mit geringem Aufwand für den Einsatz unterschiedlicher Modelle mobiler Roboter adaptieren. Somit kann das Leitsystem flexibel für die verschiedenen Automatisierungsstufen der in Abschnitt 3.2 definierten Use Cases verwendet werden und ist grundsätzlich nicht auf einige der in Kapitel 3 getroffenen Einschränkungen, vor allem hinsichtlich Größe, Typ und Gewicht der Werkzeuge limitiert. Es kommt dementsprechend auch ohne eine Automatisierung der physischen Transport- und Handhabungsprozesse aus und kann ebenso für die Planung einer manuellen Werkzeugbereitstellung genutzt werden.

4.2 Umgebung und externe Schnittstellen des Leitsystems

Im ersten Schritt der Konzeptionierung des Leitsystems wurde die Umgebung des Systems und deren Interaktion mit ihm untersucht. Dazu wird das Leitsystem selbst als Blackbox interpretiert, von dem lediglich Informationseingänge und -ausgaben betrachtet werden. Das Ziel dieser Sichtweise ist es, für die Funktion des Leitsystems relevante Entitäten, Schnittstellen zu diesen Stakeholdern und die Systemgrenzen zu identifizieren beziehungsweise zu definieren. Zur Modellierung der Systemumgebung wurde dabei auf die Spezifikationstechnik CONSENS (CONceptual design Specification technique for the Engineering of complex Systems) zurückgegriffen. CONSENS

ist ein Werkzeug des modellbasierten Systems Engineerings und verfolgt einen fachdisziplinübergreifenden Ansatz zur Modellierung mechatronischer Systeme [Tsc-2016]. Dazu stellt es ähnlich zur SysML verschiedene Diagramme zur Verfügung. Zur Analyse der Umgebung des Leitsystems wurde das Umfeldmodell verwendet, zu dem es in SysML kein explizites Pendant gibt. Zusätzlich zur Modellierung von Stakeholdern, Schnittstellen und Systemgrenzen beinhaltet das Umfeldmodell mögliche Störeinflüsse auf das betrachtete System [Gau-2018]. Die Ergebnisse der Umgebungsmodellierung sind in Abbildung 4-2 zu sehen.

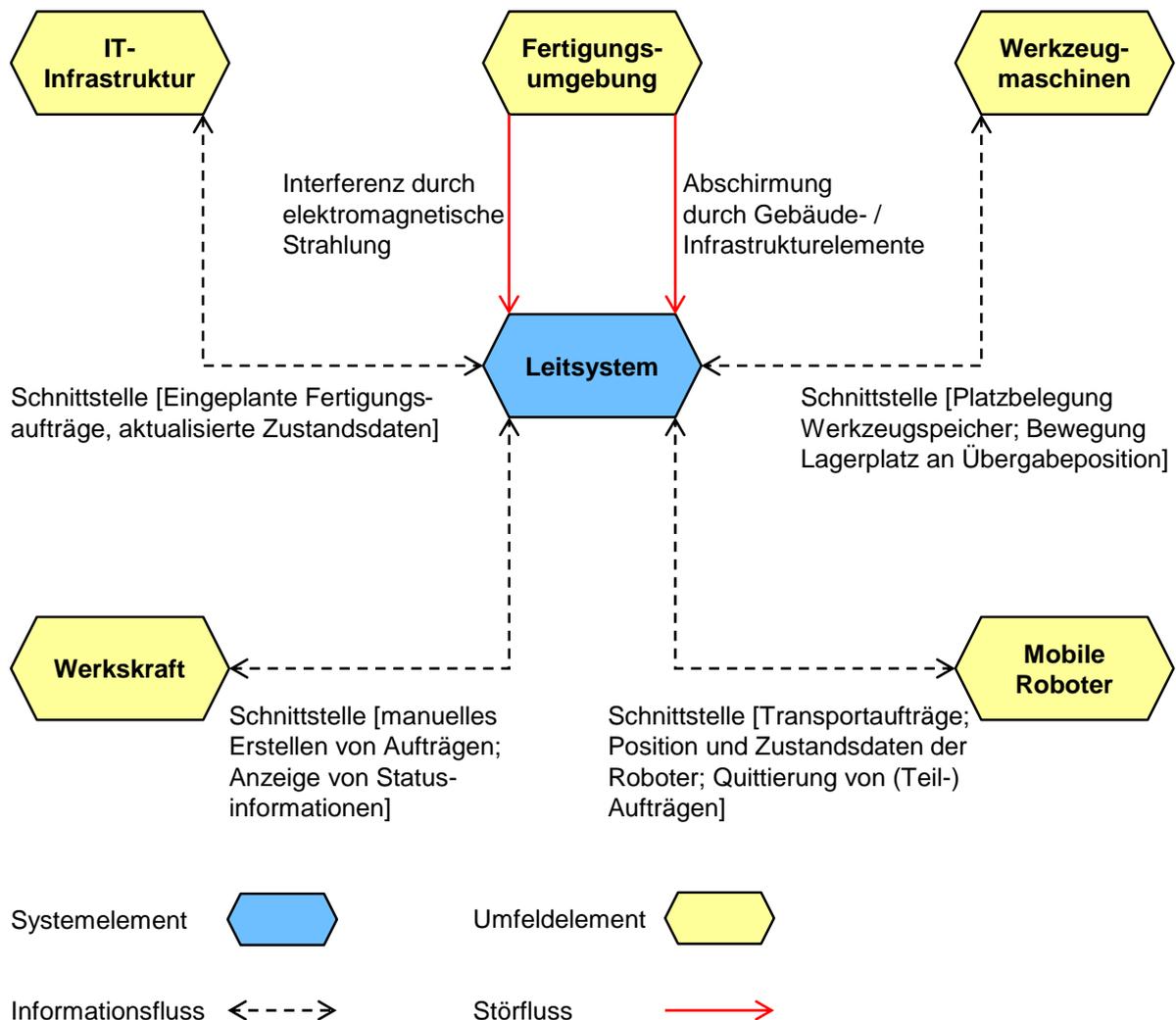


Abbildung 4-2: Umfeldmodell des Leitsystems

Im Umfeld des Leitsystems existieren fünf Akteure, die für seine Funktionalität von Bedeutung sind. Dabei handelt es sich um die existierende IT-Infrastruktur, mobile Roboter, Werkzeugmaschinen, Werkskräfte der Werkzeuglogistik oder zur Bedienung der Werkzeugmaschinen sowie die allgemeine Fertigungsumgebung. Mit Ausnahme der Fertigungsumgebung benötigt das Leitsystem zu allen Stakeholdern bidirektionale Schnittstellen zum Austausch von Informationen. Für die IT-Infrastruktur, also ERP-,

PPS- oder Werkzeugverwaltungs-Systeme, muss das Leitsystem Zugriff auf die Daten eingeplanter Fertigungsaufträge, wie Startzeitpunkt, Dauer und benötigte Produktionsressourcen, erlangen. Im Gegenzug müssen vom Leitsystem aktualisierte Zustandsdaten an externe IT-Systeme übermittelt werden. Der Werkskraft muss es über eine Schnittstelle möglich sein, sowohl Statusinformationen abzurufen als auch manuell Transportaufträge erstellen zu können. Der Informationsaustausch mit den mobilen Robotern als ausführende Instanz der automatisierten Werkzeuglogistik ist von besonderer Bedeutung. Die Roboter melden dem Leitsystem ihre Position und Zustandsdaten sowie die Bestätigung für die Ausführung von Arbeitsschritten. Auf dieser Basis erfolgt die Zuweisung von Transportaufträgen seitens des Leitsystems. Bei der drahtlosen Kommunikation mit den mobilen Robotern müssen die Störeinflüsse der Fertigungsumgebung berücksichtigt werden. Diese können sich durch die Abschirmung der Verbindung durch Gebäude- oder andere Infrastrukturelemente oder der Interferenz mit anderer elektromagnetischer Strahlung äußern. Die Schnittstelle zu Werkzeugmaschinen ist ausschließlich für Bearbeitungszentren mit internem Werkzeugspeicher relevant. Für diese könnte das Leitsystem die Platzbelegung dieser Werkzeugspeicher abfragen und eine entsprechende Bewegung an die Position zum Ein- oder Auswechseln von Werkzeugen veranlassen. Im Rahmen des Forschungsvorhabens war jedoch kein Zugang zu einem Bearbeitungszentrum zu Testzwecken möglich. Deswegen konnte die direkte Schnittstelle zu einer Werkzeugmaschine im Projekt weder softwaretechnisch noch physisch aufgegriffen werden.

Betrachtet man die Grenzen des Leitsystems zu den übrigen Elementen der automatisierten Werkzeuglogistik, so findet sich in der Umgebungsmodellierung die Aufteilung zwischen zentraler Planung und dezentraler operativen Steuerung dadurch wieder, dass zwischen Leitsystem und mobilen Robotern lediglich Transportaufträge und Positions- und Statusinformationen ausgetauscht werden und die physischen Schnittstellen an Übergabepunkten im Umfeldmodell nicht existieren. Die Abgrenzung der automatisierten Werkzeuglogistik nach außen erfolgt im Umfeldmodell sowohl bezüglich des Einflusses der Werkskräfte auf das System als auch bezüglich der Aufgabentrennung zwischen Leitsystem und externer IT-Systeme. Wie bereits in der Definition des Projekthorizonts in Abschnitt 3.1 beschrieben, benötigt das Leitsystem Informationen über eingeplante Fertigungsaufträge als Eingangsdaten und nimmt selber keine Maschinenbelegungsplanung oder Ähnliches vor. Die Verarbeitung der Eingangsdaten aus dem Umfeld des Leitsystems, wie es in der Umgebungsmodellierung erfasst wurde, zu den entsprechenden Ausgangsdaten wird im folgenden Abschnitt diskutiert.

4.3 Prozesskette innerhalb des Leitsystems

Während das Leitsystem im Umfeldmodell als Blackbox interpretiert wurde, um Umfeld, Systemgrenzen und Schnittstellen inklusive Eingangs- und Ausgangsdaten zu identifizieren, soll in diesem Abschnitt die innere Wirkstruktur des Leitsystems in den Fokus rücken. Diese ist so ausgelegt, dass sie die Planung einer korrekten und termintreuen Werkzeugbereitstellung erfüllt, und orientiert sich in ihrem Aufbau dementsprechend an den in Abschnitt 3.4.2 vorgestellten Teilaufgaben. Abbildung 4-3 zeigt die sich daraus ergebende Prozesskette.

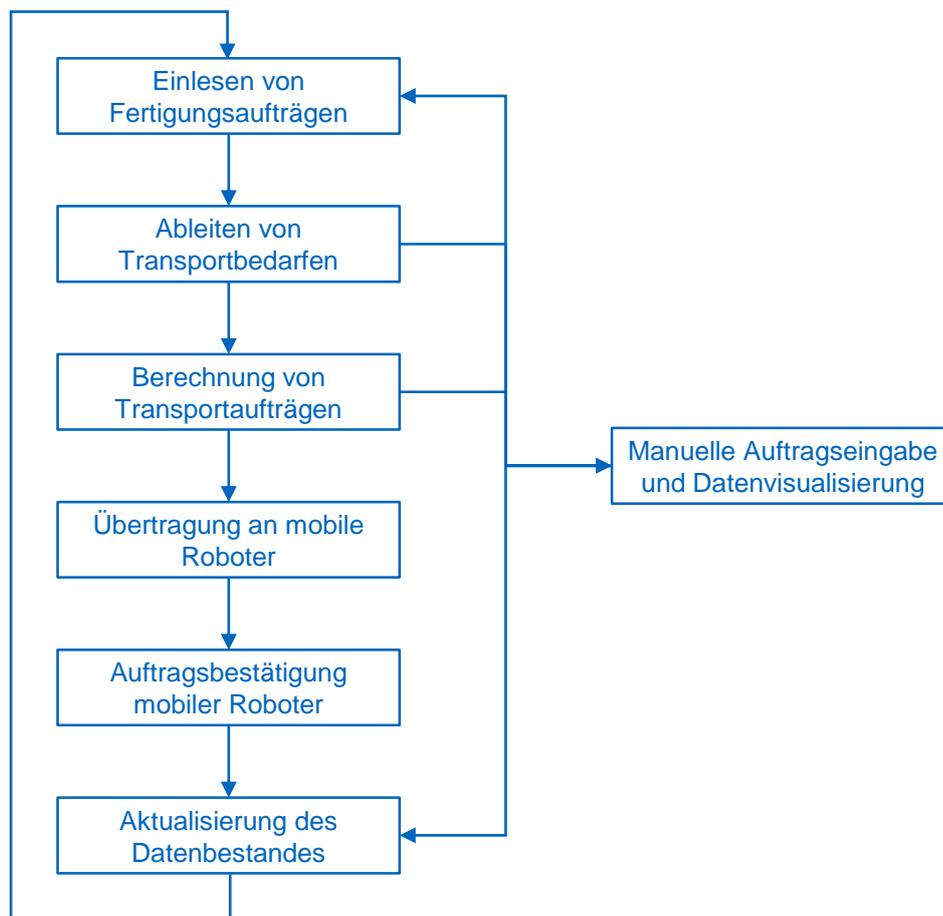


Abbildung 4-3: Prozesskette des Leitsystems als Flussdiagramm

Ausgangspunkt der Planung ist das Einlesen von Daten des Produktionssystems, innerhalb dessen das Leitsystem eingesetzt wird. Dies erfolgt über die Schnittstelle zu bestehenden IT-Systemen wie ERP und PPS. Die Informationen, die vom Leitsystem benötigt werden, betreffen dabei Daten zu eingeplanten Fertigungsaufträgen, Werkzeugen sowie Werkzeugmaschinen und -lagern und sind in Tabelle 4-1 detailliert aufgelistet. Die erhaltenen Informationen müssen anschließend im Leitsystem für die weitere Verarbeitung gespeichert werden. Um jederzeit über eine aktuelle Datenbasis zu

verfügen und damit beispielsweise auf kurzfristige Änderungen in der Maschinenbelegung oder der Auftragsreihenfolge aufgrund von Störungen oder Eilaufträgen reagieren zu können, muss die Datenabfrage aus externen IT-Systemen zyklisch erfolgen.

Tabelle 4-1: Vom Leitsystem benötigte Informationen des Produktionssystems

Fertigungsaufträge	Geplanter Startzeitpunkt, Dauer, ausführende Werkzeugmaschine, benötigte Werkzeuge, Eingriffszeit je Werkzeug
Werkzeuge	Werkzeugtyp, Werkzeugaufnahme, Standort, initiale Standzeit, aktuelle Standzeit
Werkzeugmaschinen	Standort, benötigte Werkzeugaufnahme, Lagerplätze für Werkzeuge inklusive aktueller Belegung
Werkzeuginstanz	Standort, Lagerplätze inklusive aktueller Belegung

Auf Basis der eingelesenen Fertigungsauftragsdaten ermittelt das Leitsystem anschließend, wann welche Werkzeugtypen wo bereitgestellt werden müssen. Die Bündelung dieser Informationen für die Bereitstellung eines Werkzeugs wird im weiteren Verlauf des Berichts als Versorgungsbedarf bezeichnet. Dabei ist zu beachten, dass Versorgungsbedarfe keine Informationen darüber enthalten, welches konkrete Werkzeug von welchem Standort zur Erfüllung des Bedarfs bereitgestellt wird. Zur Ermittlung der Versorgungsbedarfe können zwei Fälle unterschieden werden. Im ersten Fall wird für einen bevorstehenden Fertigungsauftrag ein Werkzeugtyp benötigt, der sich aktuell nicht an der ausführenden Werkzeugmaschine befindet. Hier kann der Versorgungsbedarf durch einen Abgleich zwischen den an der Maschine vorrätigen und den für den Fertigungsauftrag erforderlichen Werkzeugtypen ermittelt werden. Im zweiten Fall verfügt ein an der ausführenden Werkzeugmaschine präsent Werkzeug nicht mehr über eine ausreichende Standzeit, um den anstehenden Fertigungsauftrag auszuführen. Zur Identifikation dieses Zustands wird für jedes benötigte Werkzeug an der entsprechenden Maschine die verbleibende Standzeit mit der erforderlichen Eingriffszeit im Verlauf des Fertigungsauftrags verglichen. Da ermittelte Versorgungsbedarfe aufgrund von Änderungen der Eingangsdaten aus ERP und PPS Subjekt von Aktualisierungen sein können, muss auch Prozessschritt wie die Datenabfrage zyklisch durchlaufen werden. Neben der Versorgung von Werkzeugmaschinen ist die Planung des Rücktransports nicht mehr benötigter oder verschlissener Werkzeuge von den Werkzeugmaschinen zurück zur Werkzeugaufbereitung ebenfalls Aufgabe des Leitsystems. Die Notwendigkeit dieser Rücktransporte wird im Kontext des Forschungsprojekts als Entsorgungsbedarf bezeichnet. Im Gegensatz zu den Versorgungsbedarfen enthalten sie ein konkretes Werkzeug und einen Ausgangspunkt, wohingegen der Zielort noch nicht festgelegt ist. Versorgungs- und Entsorgungsbedarfe werden im Weiteren unter dem Begriff Transportbedarfe zusammengefasst.

Anschließend kombiniert das Leitsystem einzelne Transportbedarfe zu Transportaufträgen. Die Transportaufträge werden für konkrete mobile Roboter zusammengestellt und enthalten eine Liste von Stationen, die der jeweilige Roboter auf seiner Route durch das Produktionssystem zur Erfüllung der Transportbedarfe ansteuern soll, sowie die Aufgabe, die er an der jeweiligen Station zu erfüllen hat. Das zentrale Ziel bei der Erstellung der Transportaufträge ist die Berechnung möglichst effizienter Routen, um die Anzahl der benötigten mobilen Roboter zur Versorgung des betrachteten Produktionssystems zu minimieren. Die Aufgabe des Leitsystems ist in diesem Fall die Lösung eines Vehicle Routing Problems (VRP) [Irn-2014]. Da sowohl Werkzeugmaschinen als auch Werkzeuglager und -aufbereitung gleichzeitig Quellen und Senken für Werkzeuge sind, handelt es sich um eine Sonderform des VRP, die als Pickup-and-Delivery Problem (PDP) bezeichnet wird [Sav-1995]. Aufgrund des simultanen Charakters der Stationen als Quelle und Senke erhöht sich die Komplexität zur Berechnung der Transportaufträge im Vergleich zu einem VRP mit einer Quelle und mehreren Senken oder vice versa enorm [Bat-2014]. Zur Lösung des PDP gliedert sich die Berechnung der Transportaufträge in den für VRP typischen dreistufigen Prozess aus Dispatching, Routing und Scheduling [Co-1991]. Im Dispatching werden Transportbedarfe ausgewählt und Robotern zugewiesen. Dabei ist es zusätzlich notwendig, für die Versorgungsbedarfe ein konkretes Werkzeug samt Lagerplatz und für die Entsorgungsbedarfe ein Ziel für die Werkzeugaufbereitung auszuwählen. Wenn somit alle Stationen des Transportauftrags bekannt sind, wird im Routing die Reihenfolge festgelegt, in der das Aufnehmen und Abgeben von Werkzeugen durchgeführt wird. Die zweite Aufgabe des Routings, die Auswahl der Wege zwischen zwei Stationen der Route, wird als Teil der operativen Steuerung nicht vom Leitsystem, sondern vom mobilen Roboter selbst übernommen. Im Scheduling wird abschließend über den Zeitpunkt der Auftragsfreigabe entschieden. Für den skizzierten Prozess zur Lösung des VRP sind durch das Leitsystem verschiedene Randbedingungen zu berücksichtigen, um eine fehlerfreie und termintreue Werkzeugbereitstellung zu gewährleisten. Darunter fallen unter anderem die Restriktion für die Reihenfolge der Routenschritte, dass die Aufnahme eines Werkzeugs vor dessen Abgabe stattfinden muss, oder die Berücksichtigung der Transportkapazität der Roboter und des spätesten Lieferzeitpunkts. Letzteres macht eine prädiktive Abschätzung der Transport- und Handhabungszeiten der Roboter notwendig. Wie weit in die Zukunft das Leitsystem bei der Berechnung der Transportaufträge und speziell dem Scheduling antizipiert und welche Transportbedarfe berücksichtigt werden, muss vorsichtig abgewogen werden. Sobald ein Transportauftrag zur Übermittlung an den Roboter freigegeben ist, sind der Bedarf und das konkrete Werkzeug fest eingeplant, wodurch keine Reaktion auf kurzfristig auftretende Änderung mehr möglich ist. Die Routenplanung befindet sich also stets in einem Spannungsfeld zwischen Versorgungssicherheit und Flexibilität.

Der nächste Schritt stellt mit der Übertragung der Steuerungsbefehle die Schnittstelle zwischen zentralen Leitsystem und den dezentralen mobilen Robotern dar. Dazu müssen zunächst die Informationen der Transportaufträge in ein für den Roboter verständliches Format übersetzt werden. Die Transportaufträge werden zu diesem Zweck in einzelne Routenschritte heruntergebrochen, die jeweils alle Informationen für eine Aktion des Roboters enthalten. Die zu übermittelnden Daten eines Routenschrittes sind in Tabelle 4-2 aufgelistet und kurz beschrieben. Für jeden Routenschritt befindet sich entweder der Ausgangslagerplatz (bei Abgaben) oder der Ziellagerplatz (bei Aufnahmen) auf dem mobilen Roboter selbst und der jeweils andere Lagerplatz an der Zielposition. Die physische Übertragung der Daten muss sowohl kabellos als auch ohne Notwendigkeit eines direkten Sichtkontakts zwischen Sender und Empfänger erfolgen, um den Anforderungen des industriellen Umfelds gerecht zu werden, und wie bereits in der Umfeldmodellierung in Abschnitt 4.2 festgestellt eine bidirektionale Kommunikation ermöglichen. Letztere wird benötigt, damit der mobile Roboter dem Leitsystem die Ausführung des aktuellen Routenschrittes bestätigen und seine Bereitschaft für den nächsten Routenschritt des laufenden oder den ersten Routenschritt eines neuen Transportauftrags signalisieren kann.

Tabelle 4-2: Daten eines Routenschrittes

Zielposition	Zielposition für Lokomotionseinheit, von der aus Handhabungsprozesse durchgeführt werden
Ausgangslagerplatz	Lagerplatz, an dem Werkzeug aufgenommen wird
Ziellagerplatz	Lagerplatz, an dem Werkzeug abgegeben wird
Aktionstyp	Aufnahme von Werkzeug auf Roboter oder Abgabe von Werkzeug an Station
Manipulator	Benötigte Greiferbacken für das zu greifende Werkzeug (siehe Abschnitt 5.3)
Werkzeug	Zu greifendes Werkzeug

Das chronologisch letzte Glied der Prozesskette des Leitsystems ist die Aktualisierung des Datenbestandes. Dadurch wird der neue Zustand des realen Produktionssystems nach der Durchführung einer Aktion durch den Roboter in seine virtuelle Repräsentation in den IT-Systeme übertragen. Die Ergebnisse, die diese Systeme hervorbringen, können nur auf Grundlage einer mit der Realität übereinstimmenden Datenbasis zu den gewünschten Resultaten führen, weshalb die Datenaktualisierung einen kritischen Punkt im Gesamtsystem darstellt. Der neue Systemzustand muss sowohl im Leitsys-

tem direkt als auch über die Schnittstelle zu bestehenden IT-Systemen in diesen gespeichert werden. Mit diesem Schritt ist die Bearbeitung eines Routenschritts nach seiner physischen Durchführung auch informationstechnisch abgeschlossen. Obwohl die Verarbeitung eines einzelnen Bereitstellungsbedarfs der beschriebenen Prozesskette stets linear folgt, muss für die Konzeptionierung des Leitsystems beachtet werden, dass diese in der Praxis nicht sequentiell auftreten, sondern viele Bereitstellungsbedarfe in verschiedenen Stadien simultan bearbeitet werden. Deshalb muss das Leitsystem alle Prozessschritte parallel ausführen können, was durch eine Funktionsteilung und -kapselung erreicht wird, die der folgende Abschnitt beschreibt.

Parallel zu den bislang beschriebenen Prozessschritten stellt das Leitsystem eine grafische Benutzeroberfläche (GUI – graphical user interface) zur Verfügung. Diese dient hauptsächlich zur Visualisierung der aktuellen Daten und Vorgänge des Leitsystems und der mobilen Roboter. Dadurch wird die Transparenz der Aktionen der automatisierten Werkzeuglogistik für den Menschen sichergestellt, was die Akzeptanz des Systems steigert. Zusätzlich zur Anzeige von Informationen bietet das GUI die Möglichkeit, manuell Daten, wie Werkzeugbedarfe oder geänderte Werkzeugpositionen, einzugeben. Die Eingaben durch die Benutzeroberfläche werden analog zu den aus ERP- und PPS-Systemen eingelesenen Daten für die Berechnung von Transportaufträgen berücksichtigt. Diese Funktionalität ist im operativen Betrieb jedoch nur für Ausnahmefälle vorgesehen, wenn beispielsweise ein Werkzeugbruch auftritt und schnell ein Ersatzwerkzeug benötigt wird, da der Regelbetrieb durch das Leitsystem abgedeckt ist.

4.4 Elemente und Architektur des Leitsystems

Die in Abschnitt 4.3 vorgestellte Prozesskette wird im nächsten Schritt der Konzeptionierung des Leitsystems in eine geeignete Softwarearchitektur eingebettet. Das Ziel war dabei, eine Lösung zu schaffen, die größtenteils unabhängig von und mit lediglich minimalen Änderungen an bestehenden IT-Systemen im Produktionssystem operieren kann. Die Architektur basiert auf dem Modularitätsprinzip und folgt damit einem zentralen Paradigma der Softwareentwicklung [Vog-2009]. Dabei werden die umzusetzenden Funktionalitäten auf abgetrennte Systembausteine verteilt. Auf diese Weise lassen sich zum einen klare Zuständigkeiten definieren sowie eine Robustheit gegenüber Änderungen herstellen und andererseits die Anzahl der Schnittstellen innerhalb des Leitsystems und nach außen minimieren. Eine modulare Softwarearchitektur ermöglicht es weiterhin, einzelne Komponenten zunächst unabhängig voneinander zu entwickeln und diese erst später zu einem Gesamtsystem zusammenzusetzen [Foe-2001]. Diesem modularen Ansatz folgt auch der Aufbau dieses Kapitels. Im Folgenden wird

zuerst auf die einzelnen Elemente des Leitsystems eingegangen und abschließend ihr Zusammenwirken in der Gesamtarchitektur vorgestellt.

4.4.1 Datenverwaltung

Sämtliche der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Prozesse des Leitsystems basieren im Kern auf einer Erstellung und Manipulation von Daten. Daten in Softwareanwendungen verfügen im Allgemeinen über einen transienten Charakter. Das bedeutet, dass sie nicht über das Programmende hinaus gespeichert werden. Dementsprechend ist eine persistente Datenverwaltung ein obligatorischer Bestandteil der zu entwickelnden Lösung [Shu-2004]. Als metaphorisches Rückgrat des Leitsystems steht die Datenverwaltung im direkten Austausch mit allen anderen Modulen und stellt diesen die sogenannten CRUD-Operatoren zur Verfügung. Bei diesen handelt es sich um die vier fundamentalen Operationen der Datenverwaltung, dem Erzeugen (Create), Lesen (Read), Aktualisieren (Update) und Löschen (Delete) von Daten [Ion-2020]. Um diese Funktionalitäten den übrigen Modulen des Leitsystems zugänglich zu machen, gliedert sich die Datenverwaltung in vier Submodule, deren Architektur in Abbildung 4-4 skizziert ist.

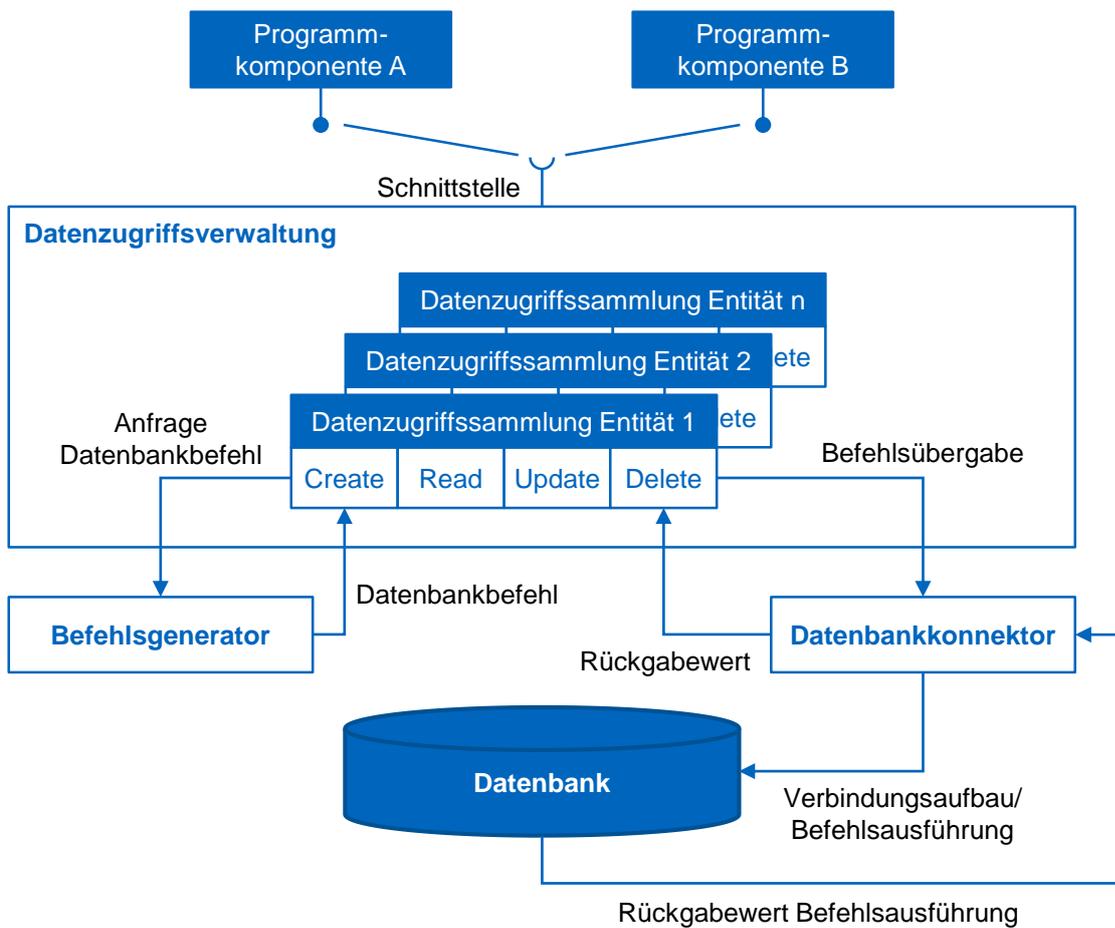


Abbildung 4-4: Architektur der Datenverwaltung des Leitsystems nach [San-2020]

Datenbank

Die Datenbank ermöglicht die dauerhafte und geordnete Speicherung von Daten. Im Fall des Typs der weitverbreiteten und auch im Projekt AutoWerk eingesetzten relationalen Datenbank werden Informationen anhand von Entitäten in separaten Tabellen strukturiert, die über unterschiedliche Relationstypen miteinander verbunden sein können [Ste-2017]. Entitäten beschreiben gleichartige Elemente, die sowohl materiell oder immateriell sein können, mit ihren jeweiligen Attributen. Die Werte der einzelnen Attribute unterscheiden sich im Allgemeinen für die einzelnen Elemente einer Entität [Abt-2017]. Beispiele für Entitäten im Kontext der Werkzeuglogistik sind Werkzeugmaschinen, Werkzeugtypen, Fertigungsaufträge und Transportbedarfe. Die Struktur einer Datenbank wird von ihrem Datenmodell beschrieben, in dem die Entitätstypen, deren Attribute und die spezifischen Relationen zwischen den Entitätstypen enthalten sind. Der detaillierte Prozess zur Datenmodellierung allgemein und im Projekt AutoWerk speziell kann Baumgartner entnommen werden [Bau-2020]. Ein Entity-Relationship- (ER-) Diagramm zur Visualisierung des Datenmodells ist in Abbildung 4-5 dargestellt. In das Datenmodell wurde eine Methodik zum Tracking und Tracing von Werkzeugen integriert. Dieses orientiert sich am parallel zum Forschungsprojekt entwickelten VDMA Standard zur Serialisierung und Kennzeichnung von Werkzeugen und Werkzeugspannmitteln, der teilweise aus den Ergebnissen des Forschungsprojekts ToolCloud am Lehrstuhl fml hervorging [VDMA-34193; Rös-2017]. Beide basieren auf den Identifikationskonzepten der Non-Profit-Organisation GS1. GS1 stellt Mitgliedsunternehmen und -organisationen weltweit eindeutige, standardisierte Kennzeichnungssysteme zur Verfügung, die eine Identifizierbarkeit und Rückverfolgbarkeit von Gütern innerhalb eines Unternehmens wie auch über Unternehmensgrenzen hinweg ermöglichen. Für die Kennzeichnung von Werkzeug- und Werkzeugaufnahmetypen wird die GTIN (Global Trade Item Number) verwendet, die in weiten Bereichen der Wirtschaft bereits den Standard zur Identifikation von Gütern darstellt. Konkrete Werkzeuge werden über eine serialisierte Version der GTIN (SGTIN) eindeutig identifiziert und ihrem Werkzeugtyp zugeordnet. Die Codierung der SGTIN auf dem Werkzeug oder der Werkzeugaufnahme erfolgt dabei über die GS1 Data Matrix, die per Lasergravur appliziert wird [VDMA-34193]. Zur standardisierten Dokumentation und Nachverfolgbarkeit von Prozessschritten kann der EPCIS-Standard (Electronic Product Code Information Services) verwendet werden. Dabei werden Ereignisse anhand der Kriterien Objekt (was?), Ort (wo?), Zeitpunkt (wann?) und Geschäftsprozess (warum?) charakterisiert und automatisiert aufgezeichnet. Auf Grundlage der EPCIS-Daten können beispielsweise Fehler nachvollzogen oder aktuelle Systemzustände abgefragt werden [Kuh-2019].

Datenzugriffsverwaltung

Die Datenzugriffsverwaltung organisiert den Zugriff der Module des Leitsystems auf die Datenbank. Dazu besitzt sie für jede Entität der Datenbank eine Zugriffssammlung, in der die CRUD-Operatoren für die jeweilige Tabelle enthalten sind. Zur Durchführung der Operatoren ist die Datenzugriffsverwaltung auf den Befehlsgenerator und den Datenbankkonnektor angewiesen. Außerdem stellt die Datenzugriffsverwaltung eine Schnittstelle für die übrigen Module des Leitsystems zur Verfügung, über die diese auf Informationen in der Datenbank zugreifen können.

Befehlsgenerator und Datenbankkonnektor

Die verbleibenden Submodule der Datenverwaltung unterstützen die Kommunikation zwischen Datenzugriffsverwaltung und Datenbank. Da zur Programmierung sämtlicher Anwendungen des Leitsystems eine objektorientierte höhere Programmiersprache notwendig ist, die Bedienung der Datenbank jedoch mittels einer Datenbanksprache erfolgt, besteht eine Sprachbarriere zwischen der Datenbank und dem übrigen Leitsystem. Um diese zu überwinden, agiert der Befehlsgenerator als Übersetzer zwischen den beiden Sprachen. Er erhält über die Datenzugriffsverwaltung Abfragen des Leitsystems, wandelt diese in Befehle der Datenbanksprache um und spielt sie der Datenzugriffsverwaltung zurück. Anschließend werden die Befehle über den Datenbankkonnektor an die Datenbank übertragen und die Rückgabewerte der Datenzugriffsverwaltung weitergegeben. Der Datenbankkonnektor ist außerdem für den Aufbau und das Schließen der Verbindung vom Leitsystem zur Datenbank zuständig.

4.4.2 Transportauftragsermittlung

Das Modul Transportauftragsermittlung umfasst die Ermittlung der Transportbedarfe sowie deren Kombination zu Transportaufträgen. Die beiden Prozesse werden, solange das Leitsystem aktiv ist, unabhängig von den übrigen Modulen zyklisch durchlaufen. Die Identifikation der Versorgungs- und Entsorgungsbedarfe erfolgt analog zu dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen Vorgehen. Dies gilt prinzipiell auch für die Berechnung der Transportbedarfe, allerdings wurde diese in drei Submodule aufgespalten, wie Abbildung 4-6 zeigt. Dabei handelt es sich um die Vorberechnung der Routenermittlung, die Routenberechnung und die Verarbeitung des Routenergebnisses. In der Vorberechnung werden für Versorgungsbedarfe sämtliche alternative Quellen für den benötigten Werkzeugtyp und für Entsorgungsbedarfe alle alternative Senken für das abzuholende Werkzeug ermittelt. Stehen diese Informationen zur Verfügung, kann die Routenberechnung beginnen.

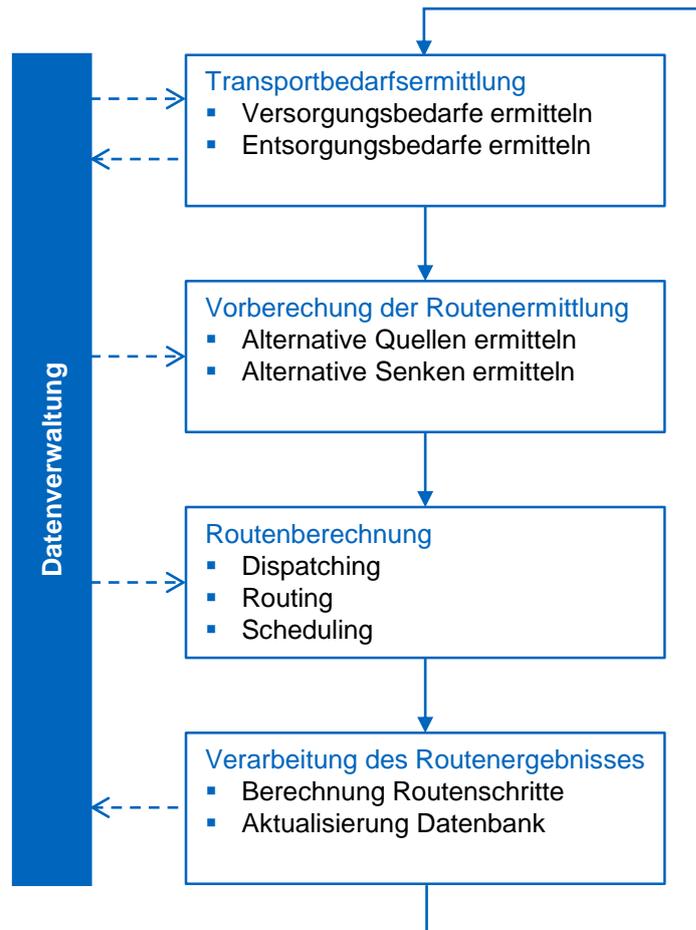


Abbildung 4-6: Ablauf der Transportauftragsermittlung

Zur Lösung des Pickup-and-Delivery Problems existieren eine Vielzahl unterschiedlicher Algorithmen, die in Produktionssystemen, die sich in Größe, Layout, Produktionsstruktur oder Ähnlichem unterscheiden, hinsichtlich Rechenzeit und Effizienz verschiedenen gute Ergebnisse erzielen. Die Routenberechnung ist aus diesem Grund so konzipiert, dass sie eine Art Plug and Play von Algorithmen unterstützt. Diese Eigenschaft wird erreicht, indem dem Submodul über eine Schnittstelle alle Daten, die für die Routenberechnung relevant sein können, zur Verfügung gestellt werden. Um zu gewährleisten, dass die Ergebnisse der Berechnung für nachfolgende Anwendungen interpretierbar sind, ist eine feste Struktur der Transportaufträge definiert, die für die weitere Verarbeitung der Route eingehalten werden muss. Aus dem Blickwinkel der übrigen Elemente der Transportauftragsermittlung kann die Routenberechnung demnach als Blackbox betrachtet werden, ohne dass – gesetzt den Fall, dass die Algorithmen korrekt implementiert sind – Einschränkungen in der prinzipiellen Funktionalität auftreten. In der Ergebnisverarbeitung erfolgt anschließend das Aufbereiten und Speichern der aus der Berechnung resultierenden und mobilen Robotern zugewiesenen Transportaufträge in der Datenbank sowie die Aktualisierung von Status. Die Transportaufträge werden dabei in einzelne Routenschritte zerlegt, die jeweils eine Anweisung an

den Roboter enthalten. Diese werden daraufhin in der Datenbank gespeichert, wo außerdem die Status der benötigten Werkzeuge, Lagerplätze und Roboter entsprechend des Transportauftrags geändert werden.

4.4.3 Flottenmanagement

Das Modul Flottenmanagement ist für die Kommunikation zwischen Leitsystem und den mobilen Robotern zuständig. Die Ausführung dieser Aufgabe wird durch das Zusammenspiel von drei Komponenten erreicht, deren Architektur in Abbildung 4-7 skizziert ist.

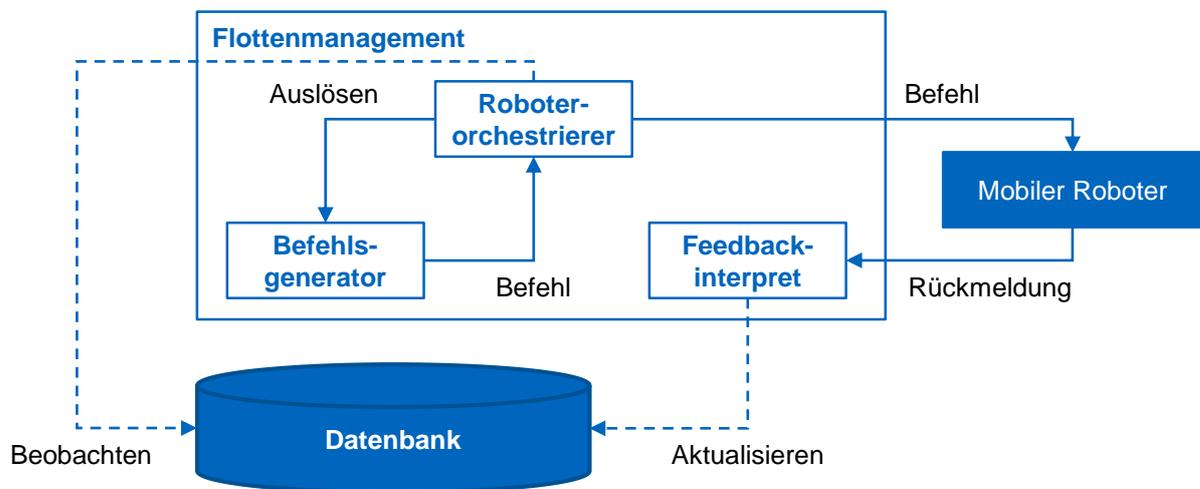


Abbildung 4-7: Architektur des Flottenmanagements des Leitsystems nach [San-2020]

Die zentrale Rolle nimmt dabei der Roboterorchestrierer ein. Er beobachtet zu einen die Status der Routenschritte und Roboter, um die nächsten Anweisungen an die jeweiligen Roboter zu identifizieren, und überträgt zum anderen die konkreten Befehle an die mobilen Roboter. Der Befehlsgenerator erfüllt eine ähnliche Funktion wie sein Namensvetter im Modul Datenverwaltung (siehe Abschnitt 4.4.1). Er übersetzt Anweisungen des Roboterorchestrierers in die vom Roboter erwartete Datenstruktur und spielt diese anschließend zurück an den Roboterorchestrierer. Die dritte Komponente, der Feedbackinterpret, ist das inverse Pendant zum Befehlsgenerator. Er empfängt und interpretiert die Antworten der mobilen Roboter und veranlasst die entsprechenden Änderungen in der Datenbank. Die Ausführung der Prozesse im Modul Flottenmanagement beginnt analog zu denen des Moduls Transportauftragsermittlung automatisch mit dem Start des gesamten Leitsystems und wird während des gesamten Operativbetriebs zyklisch durchlaufen. Abbildung 4-8 visualisiert den Ablauf eines Zyklus.

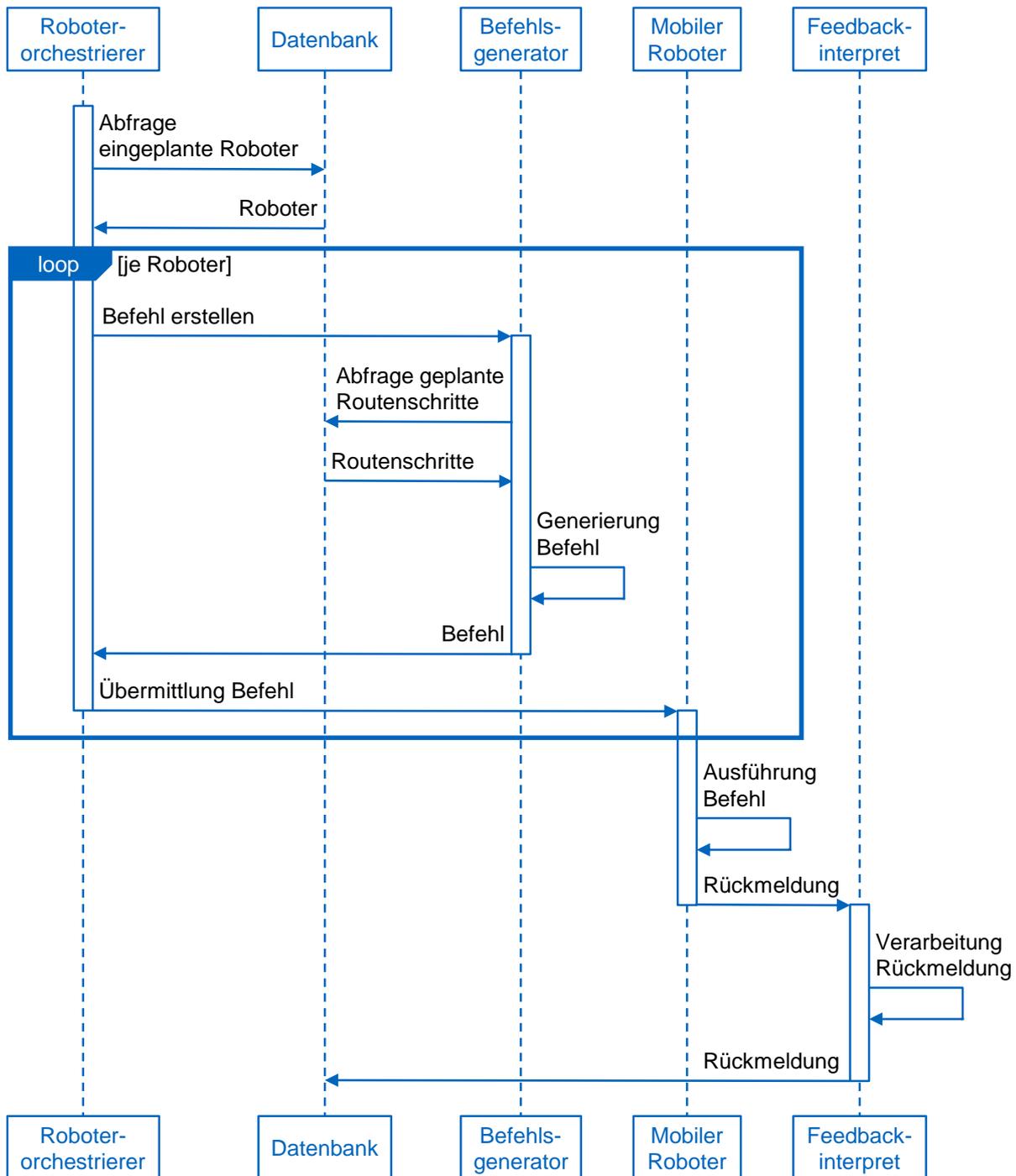


Abbildung 4-8: Ablauf des Orchestrierungsprozesses nach [San-2020]

4.4.4 Datenbestandsüberwachung

Das Modul Datenbestandsüberwachung ist dafür verantwortlich, dass das Leitsystem jederzeit über eine aktuelle Datenbasis verfügt, die den Zustand des realen Systems adäquat repräsentiert, sodass es auf dieser Grundlage korrekte Entscheidungen treffen kann. Dies betrifft sowohl die interne Datenbank des Leitsystems als auch Infor-

mationen aus externen IT-Systemen. Ebenso wie in den Modulen Transportauftragsermittlung und Flottenmanagement wird auch die Prozesskette der Datenbestandsüberwachung in einer Endlosschleife über die Laufzeit des Leitsystems ausgeführt. Die Prozesskette besteht aus den in Abbildung 4-9 dargestellten drei Schritten in denen Zustandsänderungen von Routenschritten, Transportaufträgen und Fertigungsaufträgen beobachtet werden.

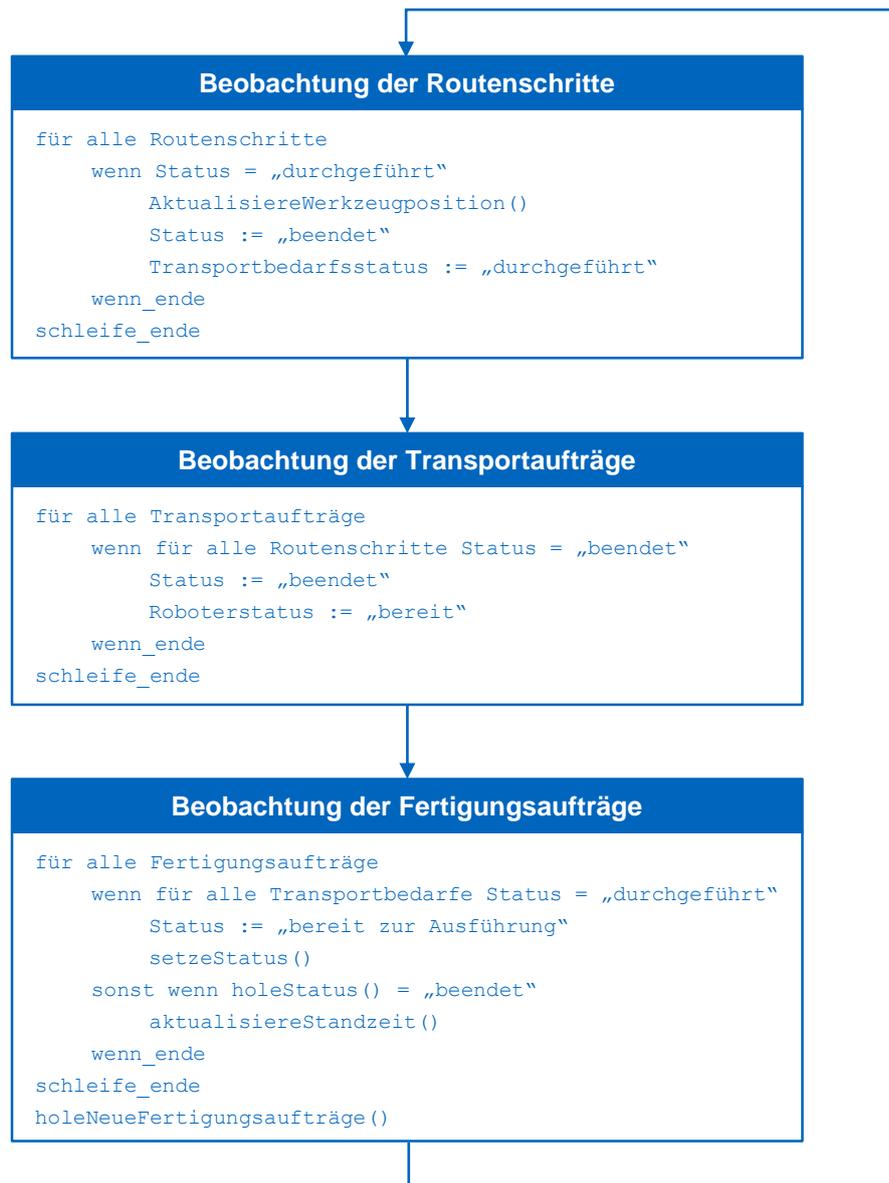


Abbildung 4-9: Pseudocode der Prozesse des Moduls Datenbestandsüberwachung

Prinzipiell laufen alle Prozessschritte nach demselben Schema ab, in dem die Datenbestandsüberwachung Tabellen der Datenbank nach verschiedenen Statusänderungen durchsucht und basierend darauf andere Einträge der Datenbank aktualisiert. Dabei operiert sie nach dem Bottom-up Prinzip, bei dem ausgehend von einzelnen Arbeitsschritten bis zu ganzen Fertigungsaufträgen vorgegangen wird. Im ersten Schritt

werden für alle Routenschritte Änderungen im Ausführungsstatus ermittelt, die durch den Feedbackinterpret des Moduls Flottenmanagement in der Datenbank vermerkt werden. Für die identifizierten Routenschritte wird zunächst die Position des zugeordneten Werkzeugs aktualisiert, der Status des assoziierten Transportbedarfs von „eingepplant“ auf „durchgeführt“ geändert und anschließend der Status des Routenschritts von „durchgeführt“ auf „beendet“ aktualisiert. Daraufhin erfolgt die Überprüfung der Transportaufträge. Für jeden Transportauftrag werden zunächst die Status aller zugehörigen Routenschritte abgerufen. Sind diese alle „beendet“, kann auch der Status des gesamten Transportauftrags auf „beendet“ gesetzt werden. Sobald ein Transportauftrag abgeschlossen wurde, kann auch der Status des ausführenden Roboters von „eingepplant“ auf „bereit“ aktualisiert werden. Abschließend werden die Fertigungsaufträge betrachtet. Dazu werden für alle Fertigungsaufträge die zugeordneten Transportbedarfe durchsucht. Verfügen alle über den Status „durchgeführt“, wird der Status des Fertigungsauftrags auf „bereit zur Ausführung“ gesetzt und an externe IT-Systeme weitergegeben. Ansonsten erfasst die Datenbestandsüberwachung den Status des Fertigungsauftrags aus den externen IT-Systemen und übernimmt ihn in die interne Datenbank. Wenn der neue Status des Fertigungsauftrags „beendet“ ist, aktualisiert die Datenbestandsüberwachung die verbleibende Standzeit der eingesetzten Werkzeuge entsprechend der jeweiligen Eingriffsparameter. Ist dieses Prozedere für alle Fertigungsaufträge in der Datenbank des Leitsystems durchlaufen, prüft die Anwendung, ob in den externen IT-Systemen neue Fertigungsaufträge vorliegen, die für das Leitsystem relevant sind, überträgt diese in die interne Datenbank, und der Zyklus beginnt von Neuem.

4.4.5 Kommunikationssystem

Das Kommunikationssystem ist für den Datenaustausch zwischen dem Roboterorchestrierer des zentralen Leitsystems und den auf dem Shop Floor verteilten mobilen Robotern zuständig. Die vom Leitsystem erstellten Transportaufträge werden dazu in Routenschritte überführt. Diese Routenschritte enthalten alle Informationen für eine Aktion des Roboters. Die zu übermittelnden Daten eines Routenschrittes wurden bereits in Tabelle 4-2 beschrieben.

Zum Aufbau eines Kommunikationssystems nach Shannon und Weaver stehen eine Vielzahl an Technologien bereit, die ein breites Spektrum an Kombinationsmöglichkeiten bieten [Sha-1998]. Dabei sind die verfügbaren Technologien zum Aufbau eines Kommunikationssystems maßgeblich von der standortspezifischen Infrastruktur, den industriellen Eigenschaften sowie den produktspezifischen Modulen des mobilen Roboters abhängig. Um trotz allem eine modulare und flexible Lösung zu realisieren, welche auf verschiedene Unternehmen und Anwendungsfälle übertragbar ist, wurde eine

Methode zur Konzeption eines Kommunikationssystems für mobile Roboter in Produktionsumgebungen erarbeitet. In dieser Methode werden die Kriterien und Rahmenbedingungen systematisch erfasst und in Anforderungen überführt. Innerhalb einer Anforderungsanalyse (entsprechend SysML) werden die resultierenden Anforderungen priorisiert, evaluiert und dokumentiert. Anhand dieser Anforderungen wird eine geeignete Auswahl des Kommunikationssystems zur optimalen Datenübertragung getroffen. Im Kontext der mobilen Robotik können für den Datenaustausch nur drahtlose, flächendeckende und sichtkontaktlose Kommunikationstechnologien eingesetzt werden. Anhand dieser Rahmenbedingungen können Technologien ausgeschlossen werden, welche nicht für die Kommunikation mit mobilen Robotern geeignet sind. Die Funktechnologie wurde dabei als eine unerlässliche Schlüsseltechnologie identifiziert.

Die Aufgaben der Datenübertragung in einem Kommunikationssystem sind in verschiedene Schichten unterteilt, die innerhalb eines Referenzmodells definiert sind. Dabei wurde das Transmission Control Protocol (TCP)/ Internet Protocol (IP)-Referenzmodell als Designgrundlage für die Kommunikation verwendet [Kad-2005]. Für jede Schicht des TCP/IP-Referenzmodells wurde eine geeignete Auswahl getroffen und zu einem Protokollstapel kombiniert. Die Standards der Funktechnologie definieren die untere Schicht (Netzwerkschicht) des TCP/IP-Modells. In den höheren Schichten gibt es mehrere Protokolle für die Kommunikation in und mit Robotern. Besonderer Fokus gilt dabei der Anwendungsschicht. Dabei gibt es Grundsätzlich zwei Möglichkeiten Protokolle in der Anwendungsschicht zu implementieren. Es können offene Internetprotokolle wie z.B. Hypertext Transfer Protocol (HTTP), Representational State Transfer (REST) oder WebSockets für die einfache und standardisierte Integration eines Roboters in das Internet eingesetzt werden [Kaz-2015]. Der Nachteil eines großen Overheads und einer langsamen Übertragung schränkt jedoch die Effizienz des Datenaustauschs ein [Kaz-2015]. Daher sind diese Protokolle nicht optimal für den Einsatz in mobilen Robotern geeignet. Dagegen gibt es leichtgewichtige Protokolle die speziell für die Machine-to-Machine (M2M)-Kommunikation entwickelt wurden, wie Constrained Application Protocol (CoAP) oder Message Queue Telemetry Transport Protocol (MQTT) [Kaz-2015]. Diese Protokolle wurden für den effizienten Austausch von kleinen Datenmengen mit kleinem Overhead optimiert.

Um die Interoperabilität zwischen dem Kommunikationssystem und der internen Robotersteuerung zu gewährleisten wurden zudem Roboter Software Frameworks betrachtet. Die Funktechnologien, Übertragungsprotokolle und Roboter Software Frameworks, welche zum Aufbau eines Kommunikationssystems notwendig sind, wurden durch eine gewichtete Bewertungsmatrix anhand von Anforderungen qualitativ bewertet. Dabei wurden qualitative Faktoren, bezüglich technischer und sicherheitstechni-

scher Eignung berücksichtigt. Dies gilt insbesondere in Bezug auf Reichweite, Bandbreite, Bitrate, Performanz, Energieverbrauch, Sicherheit, Zuverlässigkeit, Störanfälligkeit und Fehlertoleranz. Die geeigneten Funktechnologien, Übertragungsprotokolle und Roboter Software Frameworks wurden zu einem Protokollstapel entsprechend dem TCP/IP-Referenzmodell kombiniert und auf Interoperabilität geprüft. Die Bewertung wurde durch quantitative Faktoren finalisiert, um die wirtschaftliche Eignung zu prüfen. Dabei wurden Kosten der Hard- und Software sowie deren Implementierung berücksichtigt, welche in Bezug auf die standortspezifische Infrastruktur und die Hardwarekonfiguration der eingesetzten mobilen Roboter erfolgte.

4.4.6 Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche dient als Schnittstelle zwischen dem Leitsystem und der Werkkraft. Im Regelbetrieb ist ein manueller Eingriff einer Werkkraft in das Leitsystem nicht notwendig, da die Planung und Steuerung der Werkzeugtransportaufträge ausreichend über das Leitsystem abgedeckt werden. Im realen Produktionsbetrieb können jedoch Fehler auftreten, wie beispielsweise ein Werkzeugbruch. Weiterhin fehlt eine ganzheitliche Vernetzung verschiedener Anlagen, Maschinen und IT-Systeme, welche eine kontinuierliche Datenerfassung und Kommunikation ermöglichen [Rei-2017]. Aufgrund dieser Defizite ist es notwendig, dass eine Werkkraft manuell auf das Leitsystem zugreifen kann. Eine Benutzeroberfläche ermöglicht diesen Zugriff. Dabei werden aktuelle Daten und Vorgänge des Leitsystems visualisiert und die Transparenz über die Vorgänge des mobilen Roboters geschaffen. Zusätzlich zur Visualisierung von Informationen dient die Benutzeroberfläche dazu, manuell Daten wie Werkzeugbedarfe oder Werkzeugpositionen anzulegen, anzupassen, zu überwachen oder zu löschen. Diese Funktionen entsprechen ebenfalls den bereits vorgestellten CRUD-Operationen. Zudem ist über die Benutzeroberfläche die Visualisierung der Positionen und Vorgänge sowie die Initiierung des Batterieladevorgangs der mobilen Roboter möglich.

Der Einsatz eines mobilen Roboters erschwert die Akzeptanz und das Vertrauen der Werkkraft in ein System [Brö-2016]. Vertrauen, Akzeptanz und der wahrgenommene Nutzen haben jedoch einen hohen Einfluss darauf, ob ein Mitarbeiter ein System benutzt [GEF-2004]. Wird weiterhin die Benutzerfreundlichkeit (Usability) eines Systems vernachlässigt, ist der Nutzen gering, da die psychische Belastung der Mitarbeiter aufgrund von Unsicherheit und Skepsis zunimmt und dazu führen kann, dass der Mitarbeiter das System umgeht [Rei-2017]. Ausgehend von diesen Aspekten nimmt die Bedeutung einer transparenten und benutzerfreundlichen Benutzerschnittstelle kontinuierlich zu. Bei der Konzeption der Graphischen Benutzeroberfläche wurde deshalb eine hohe Benutzerfreundlichkeit fokussiert. Zur Steigerung der Benutzerfreundlichkeit

wurden einige Funktionen zusätzlich über eine sprachbasierte Benutzeroberfläche (VUI – Voice User Interface) realisiert.

Graphische Benutzeroberfläche

Das GUI dient als Standardschnittstelle zwischen der Werkskraft und dem Leitsystem. Die Konzeption und Entwicklung des GUI erfolgte auf Basis des V-Modells. Das V-Modell dient als Vorgehensmodell für die Systementwicklung [VDI-2206]. Dabei wurde die Konzeption in einem Top-Down-Design realisiert. Die verschiedenen Funktionalitäten wurden hingegen durch eine Bottom-up-Integration in agilen Iterationen programmiert und implementiert. Die Erfassung von Anforderungen ist ein wesentlicher Schritt zu Beginn des Konzeptionsprozesses. In einem Anforderungsdiagramm wurden Anforderungen bezüglich der Bedienung, Entwicklung und Benutzerfreundlichkeit definiert. Aus diesen Anforderungen wurden die Hauptfunktionen abgeleitet, das graphische Layout über Mock-Ups definiert und die Datenbedarfe festgelegt. Über die Benutzeroberfläche können die Funktionen *Werkzeugbedarf anfordern*, *Werkzeugbedarf anzeigen*, *Werkzeugbedarf ändern* und *Werkzeugbedarf löschen* aufgerufen werden. Zudem werden die Funktionen *Roboterstatus anzeigen* und *Roboter laden* bereitgestellt. Nachdem die Hauptfunktionen definiert wurden, werden die graphischen Elemente und das Layout in Mock-Ups für die jeweiligen Funktionen gestaltet. Parallel zur Gestaltung der Mock-Ups wurde festgelegt, welche Daten in welchem Format zur Ausführung der Funktion von der Werkkraft benötigt werden und welche Daten in welcher Darstellung der Werkkraft präsentiert werden.

Die Benutzeroberfläche wurde als mobile Web-Anwendung entwickelt, welche als Client über einen Webserver auf die Datenbank zugreift. Dabei übernimmt der Browser einen Großteil der Interaktion und Verarbeitung und ermöglicht somit eine hohe Performanz. Webanwendungen bestehen grundsätzlich aus einem Frontend und einem Backend. Das Frontend ist die Oberfläche die der Benutzer der Anwendung sieht. Das Backend dient der Administration, Verwaltung und Datenpflege. Neben der Einteilung in Front- und Backend beschreiben Komponenten die Architektur von Webanwendungen. Die Architektur besteht aus der Präsentationsoberfläche mit den grafischen Elementen; der Präsentationslogik, die den Interaktionsablauf steuert und die Geschäftslogik, die die Eingaben verarbeitet [Fis-2015]. Neben der Einteilung in Komponenten wird in der modernen UI-Entwicklung das Model-View-ViewModel (MVVM) Architekturmuster verwendet [Jae-2016]. Es bietet eine Vorlage, um GUI auf eine standardisierte und strukturierte Weise zu implementieren. Darüber hinaus hat das MVVM-Pattern wenige Abhängigkeiten, was eine gute Wartbarkeit der Komponenten ermöglicht. Im MVVM-Pattern werden die Aufgaben auf klar definierte Komponenten verteilt. Die View-Komponente ist für die Darstellung der Benutzeroberfläche verantwortlich. Das ViewModel enthält die Datenfelder und die Verarbeitung von Benutzereingaben. Das

Model enthält die reduzierte Datenhaltung und besteht aus Entity-Objekten. Die Geschäftslogik ist in einer separaten Komponente implementiert. Der Entwurf der Architektur ist ein wichtiger Schritt im Konzeptionsprozess [Zie-2002]. Neben der Architektur wurde festgelegt, welche Softwarewerkzeuge, Frameworks, Bibliotheken, Programmiersprache und Entwicklungsumgebung während der Entwicklung der Anwendung verwendet wird. Die verwendeten Technologien haben einen großen Einfluss auf die Performanz, Stabilität, Skalierbarkeit, Sicherheit und Wartbarkeit der Anwendung. Dies gilt insbesondere für das verwendete Frontend-Framework. Dabei stehen viele Frameworks zur Auswahl wie Bootstrap, Vue, Angular und React, welche die Entwicklung der Webanwendung erleichtern. Darüber hinaus wurde eine Anwendungsprogrammierschnittstelle (API – Application Programming Interface) eingerichtet, welche eine Verbindung zwischen dem Server und dem Client herstellt.

Während der Konzeption wurde insbesondere ein benutzerzentriertes und benutzerfreundliches Design mit intuitiver Benutzerführung fokussiert, um die Akzeptanz und Verwendung des Gesamtsystems zu erhöhen. Dabei trägt ein übersichtliches Design und die schnelle und dynamische Rückmeldung auf Benutzereingaben zur Erhöhung der Usability bei.

Sprachbasierte Benutzeroberfläche

Das VUI dient als Anreicherung des GUI, um die Usability des Gesamtsystems für die Werkkraft zu steigern. Dabei können ausgewählte Funktionen sowohl über das GUI als auch sprachbasiert über das VUI ausgeführt werden. Das VUI dient zur Informationsbereitstellung und manuellen Steuerung der Werkzeugbedarfe des mobilen Roboters. Ziel des VUI ist es, die Ein- und Ausgabe von Informationen und komplexen mehrstufigen Steuerungsbefehlen sprachbasiert bereit zu stellen. Über einen Sprachassistenten werden Informationen zu den Transportaufträgen der Werkzeugbedarfe bereitgestellt, wie bspw. deren Status, Inhalt und Ankunftszeit. Zusätzlich können auch Informationen zu den mobilen Robotern abgefragt werden. Werkzeugbedarfe können über das VUI sprachbasiert erstellt, gelöscht und abgefragt werden. Das VUI kann unabhängig von dem GUI verwendet werden. Dabei wurde die sprachbasierte Interaktion über ein Headset als geeignete Hardware im produktionstechnischen Umfeld gewählt. Speziell die geringere Beeinflussung von Lautstärke und Störgeräuschen, bedingt durch die körpernahe Verwendung von Headsets, ist ein entscheidender Faktor. Weiterhin ist die Bedienung ohne den Einsatz der Hände und ohne visuelle Ablenkung vorteilhaft für Maschinenbediener und Werkkraft. Somit wurde eine Bedienung ohne das Unterbrechen des Arbeitsprozesses gewährleistet. Das VUI ermöglicht durch den dynamischen Interaktionsverlauf, ohne die Verwendung von statischen Kommandoabfolgen, eine intuitive Bedienung der Anwendung.

Zunächst wurden die verschiedenen Funktionen, die mit dem VUI durchgeführt werden können, konzeptionell ausgestaltet. Zentrale Aktivität in der Designphase war die Modellierung des Gesprächsverlaufs im Interaktionsdesign. Hierzu wurde die Onlineplattform Fable.io zur Modellierung und zum Testing der sogenannten Storyboards verwendet. Des Weiteren wurde die benötigte domänenspezifische Taxonomie im Werkzeugwesen identifiziert, welche im Interaktionsdesign zur Erstellung der Gesprächsverläufe benötigt wurde. Grundsätzlich empfiehlt es sich, zunächst mit der Beschreibung des idealtypischen Verlaufs des Dialogs (*Happy Paths*) für jede auszuführende Funktion zu beginnen. Zudem wurden verschiedene Alternativwege dieses idealen Dialogs modelliert, von der initialen Interaktion bis zur erfolgreichen Erfüllung der spezifischen Funktion. Für jede Funktion wurde eine aussagekräftige Bezeichnung des Intents (Nutzerabsicht) gewählt. In mehreren Iterationen wurden alle möglichen Gesprächsverläufe erarbeitet. Weiterhin wurden verschiedene Beispielformulierungen (Sample Utterances) generiert und variable Werte (Slots) identifiziert. Als Richtwert gelten 30 Beispielformulierungen für eine Nutzerabsicht. Durch dieses Vorgehen wurden nichtlineare, mehrstufige Gesprächsverläufe schrittweise modelliert. Nach der initialen Erstellung wurden die Storyboards durch Nutzertests evaluiert, um eine nutzerzentrierte Gestaltung und hohe Usability zu gewährleisten. Dabei wurden die Storyboards und Sample Utterances kontinuierlich bis zum fertigen VUI überprüft, angepasst und weiterentwickelt.

4.4.7 Gesamtarchitektur

Nachdem die vorhergegangenen Abschnitte die Funktionsweise der einzelnen Module des Leitsystems vorgestellt haben, soll nun deren Zusammenwirken im Ganzen betrachtet werden. Abbildung 4-10 zeigt dazu eine schematische Darstellung der Softwarearchitektur. Das Leitsystem benötigt nach außen lediglich zwei bidirektionale Schnittstellen. Eine von der Datenbestandsüberwachung zu externen IT-Systemen, um Informationen zu Fertigungsaufträgen abzurufen und Änderungen des Systemzustands zurückzugeben, und die andere vom Flottenmanagement zum Kommunikationssystem, über das der Datenverkehr mit den mobilen Robotern erfolgt. Im Inneren ist das Leitsystem in die in Abschnitt 4.4 vorgestellten Module unterteilt, die mit Ausnahme der Datenverwaltung vollkommen unabhängig voneinander operieren. Dazu besitzen sie jeweils eine bidirektionale Schnittstelle zur Datenverwaltung. Der Austausch mit den anderen Modulen erfolgt indirekt über das Ändern von Einträgen in der Datenbank, die von anderen Modulen identifiziert werden und dort Aktionen auslösen. So überträgt beispielsweise die Datenbestandsüberwachung neue Fertigungsaufträge aus externen IT-Systemen in die Datenbank, wo sie von der Transportauftragsermittlung als neu erkannt werden. Dies veranlasst sie dazu, neue Transportbedarfe und im nächsten Schritt daraus Transportaufträge zu erstellen, die sie ebenfalls in die Daten-

bank schreibt. Dort werden sie vom Flottenmanagement identifiziert und an die mobilen Roboter weitergegeben. Deren Rückmeldungen werden in die Datenbank übernommen und von der Datenbestandsüberwachung erfasst, womit sich der Kreis schließt. Dabei nutzen die drei genannten Module dieselbe Schnittstelle zur Datenverwaltung. Für das GUI ist eine separate Schnittstelle zur Datenverwaltung vorgesehen, da sich die Programmiersprachen für Benutzeroberflächen üblicherweise von denen anderer Anwendungen unterscheiden. Die Benutzeroberfläche gibt Eingaben des Benutzers in Form von Datenbankabfragen oder Datenmanipulationen an die Datenverwaltung weiter, die im zweiten Fall Aktionen in anderen Modulen auslösen können.

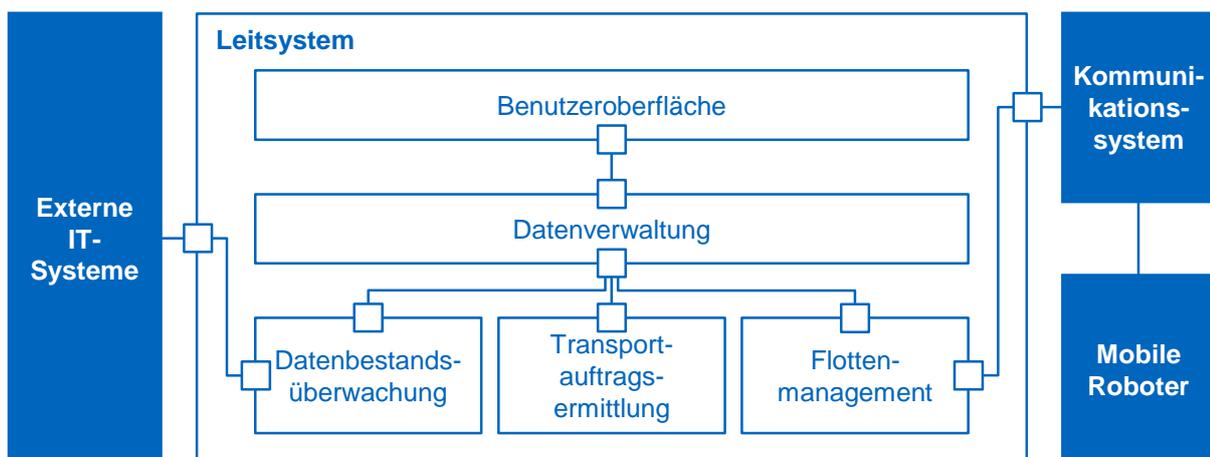


Abbildung 4-10: Gesamtarchitektur des Leitsystems nach [Rie-2020]

4.5 Implementierung der Systembestandteile

Das am Anfang des vorangegangenen Abschnitts formulierte Ziel, die Anzahl an internen sowie externen Schnittstellen gering zu halten und eine unkomplizierte Integration in die bestehende IT-Infrastruktur eines Unternehmens zu ermöglichen, konnte durch die vorliegende Softwarearchitektur konzeptionell umgesetzt werden. Für die konkrete Implementierung der Systembestandteile wurde eine Drei-Schichten-Architektur gewählt. Dabei werden die Module in übereinanderliegenden Schichten angeordnet, wobei höher liegende Schichten Methoden, die niedrigere Schichten bereitstellen, nutzen. Umgekehrt haben niedrigere Schichten keine Möglichkeit (und auch keine Notwendigkeit) zur Interaktion mit höheren Schichten. Ebenso wie die Modularisierung trägt die Schichten-Architektur zu einem einfachen Austauschen oder Anpassen der Schichten bei [Fow-2015]. Die drei Schichten sind, beginnend mit der untersten,

- **Datenhaltungsschicht:** Sie ist primär für das persistente Speichern und Laden von Daten verantwortlich. Dazu stellt sie eine Logik zur Verfügung, über die

andere Teilsysteme den Datenbestand manipulieren oder Informationen abfragen können. Die Datenhaltungsschicht lässt sich weiter in Persistenz- und Datenschicht unterteilen. Sie umfasst dementsprechend die Datenbank in der Datenschicht sowie Datenzugriffsverwaltung, Befehlsgenerator und Datenbank-konnektor in der Persistenzschicht.

- Logikschicht: In ihr erfolgt die Datenverarbeitung der Anwendung. Sie enthält somit die Module Datenbestandsüberwachung, Transportauftragsermittlung und Flottenmanagement mit ihren Submodulen.
- Präsentationsschicht: Sie bildet die Schnittstelle zwischen Leitsystem und Benutzer, indem sie dessen Eingaben verarbeitet und an untergeordnete Schichten weitergibt. Sie wird im Leitsystem durch die Benutzeroberfläche abgebildet.

Der Aufbau des Abschnitts orientiert sich an den drei Schichten, deren Implementierung im Folgenden beschrieben wird.

4.5.1 Daten- und Persistenzschicht

Zur Implementierung der Datenschicht wurde eine auf der weit verbreiteten Datenbanksprache SQL basierende Datenbank gewählt. Die Datenschicht umfasst neben der Datenbank selbst zusätzlich ein Datenbankmanagementsystem, das den Zugriff auf und die Interaktion mit der Datenbank ermöglicht und in gängiger Datenbanksoftware bereits integriert ist. Die Struktur der Datenbank orientiert sich an dem in Abschnitt 4.4.1 vorgestellten ER-Modells, bildet dieses jedoch nicht vollständig nach. Die Abweichung ist in einer Abwägung zwischen Empfehlungen zur Konzeptionierung und der realen Arbeit mit einer Datenbank begründet. Im Zuge der globalen Datennormalisierung innerhalb der Datenmodellierung werden sämtliche Redundanzen eliminiert, um die Datenkonsistenz sicherzustellen [Ste-2017]. Im Vergleich zum konzeptionellen ER-Modell wurde bei der Implementierung eine zusätzliche Verbindung eingefügt, die zwar in der Logik der Datenbank keinen Mehrwert liefert, dem Programmierer der Logikschicht allerdings eine intuitivere und benutzerfreundlichere Verknüpfung zweier Entitäten ermöglicht, indem sie ihm einen Umweg über drei andere Entitäten erspart. Das Risiko für Verletzungen der Datenkonsistenz ist dabei jedoch nahezu ausgeschlossen. Die Integration eines EPCIS-Repositorys, wie in Abschnitt 4.4.1 diskutiert, wurde nicht explizit umgesetzt. Die Voraussetzungen für eine nachträgliche Erweiterung der Datenbank um ein solches Archiv sind jedoch getroffen worden.

Die Persistenzschicht ist in der objektorientierten Programmiersprache C# implementiert. Wie bereits beschrieben, ist es die Aufgabe der Persistenzschicht, der Logikschicht Zugriff auf die Datenbank zu ermöglichen. Dazu existiert für jede Entität der Datenbank eine korrespondierende Klasse in der Persistenzschicht (siehe Abbildung

4-11). Die einzelnen Datensätze der Entitäten werden dementsprechend durch Instanzen dieser Klassen repräsentiert. Zur Generierung der Instanzen stellt die Persistenzschicht eine Schnittstelle für die Module der Logikschicht zur Verfügung, die so aufgebaut ist, dass der Befehlsgenerator aus den Anfragen der Logikschicht in C# Befehle für die Datenbank in SQL erstellen kann.

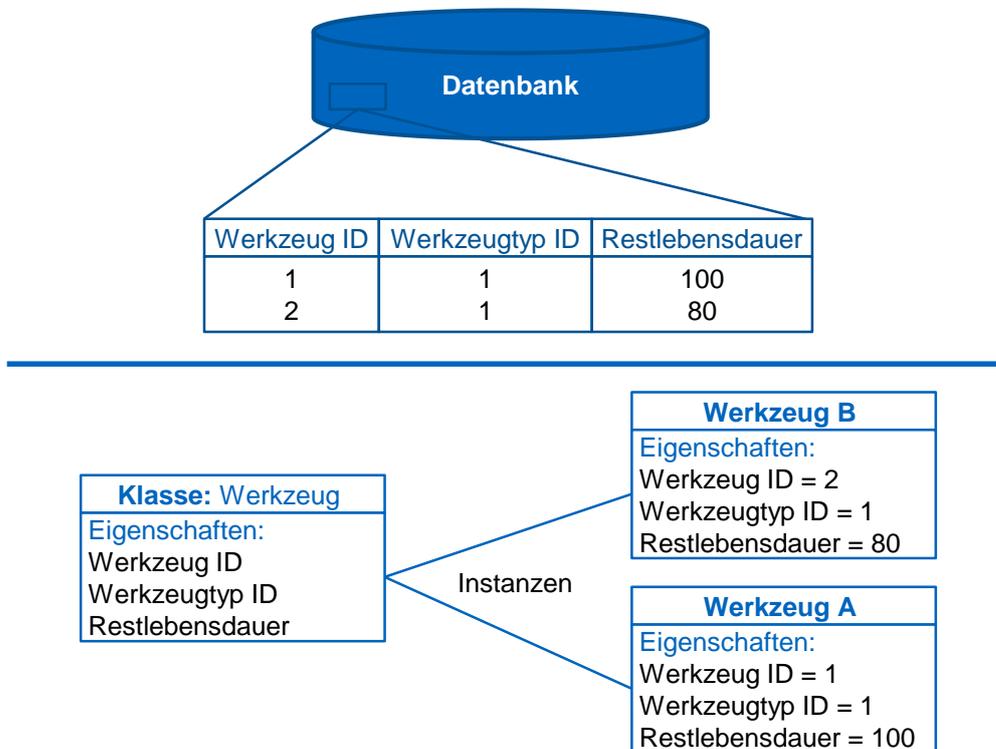


Abbildung 4-11: Repräsentation einer Entität am Beispiel Werkzeug in der Datenbank (oben) und im Softwareframework (unten) nach [San-2020]

4.5.2 Logikschicht

Die Module der Logikschicht – Datenbestandsüberwachung, Transportauftragsermittlung und Flottenmanagement – sind als drei separate Programme in C# umgesetzt, die wie in der Konzeptionierung vorgesehen unabhängig voneinander jeweils in einer Dauerschleife durchlaufen werden, solange das Leitsystem aktiv ist. Auch die Funktionalitäten der einzelnen Module entsprechen im Großen und Ganzen dem in Abschnitt 4.4 vorgestellten Konzept. Die Schnittstelle zwischen externen IT-Systemen und Datenbestandsüberwachung konnte in Ermangelung eines verfügbaren ERP- oder PPS-Systems nicht implementiert werden. Da es sich bei der Programmierung solcher Schnittstellen zu externen IT-Systemen allerdings um eine sehr häufig auftretende Prozedur handelt, ist eine entsprechende nachträgliche Erweiterung des Leitsystems problemlos möglich. Zur Lösung des PDP in der Transportauftragsermittlung wurde ein vergleichsweise unkomplizierter Algorithmus basierend auf der Nearest-Neighbour-Heuristik implementiert. Dieser funktioniert zwar stabil, liefert jedoch keine

optimalen Lösungen. Aufgrund der einfachen Austauschbarkeit von Routingalgorithmen, die in der Konzeptionierung berücksichtigt wurde (siehe Abschnitt 4.4.2), lassen sich im Nachhinein beliebige Algorithmen integrieren. Generell stellt die effiziente Lösung des PDP in der Intralogistik eine bislang unbeantwortete Forschungsfrage dar, deren Untersuchung über die Werkzeuglogistik hinaus wertvolle Erkenntnisse liefern kann.

Der Datenaustausch zwischen Flottenmanagement und mobilem Roboter ist über das Netzwerkprotokoll MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) gelöst. Über die Verbindung, die durch MQTT über einen sogenannten Broker zwischen den beiden Recheneinheiten etabliert wird, können wie in der Konzeptionierung vorgesehen bidirektional Informationen ausgetauscht werden. Voraussetzung ist eine Netzwerkverbindung zwischen den Parteien, die in Abschnitt 3.4.2 thematisiert wird. Parallel zum Forschungsvorhaben wurde vom Verband der Automobilindustrie (VDA) eine Empfehlung für die Auslegung einer einheitlichen Kommunikationsschnittstelle zwischen Leitsystemen und mobilen Transportfahrzeugen entwickelt, die ebenfalls auf MQTT basiert. [VDA-5050]. Die Empfehlungen der VDA 5050 sind allerdings zum einen auf fahrerlose Transportfahrzeuge (FTF), die im Vergleich zu den mobilen Robotern im Projekt AutoWerk nur stark eingeschränkte Handhabungsoperationen durchführen können, und zum anderen auf deutlich zentralistischer organisierte Leitsysteme ausgelegt. Deshalb wurde die Empfehlung zur Strukturierung von Nachrichten zwischen Leitsystem und mobilen Robotern im Projekt nur teilweise gefolgt. Grundsätzlich ist die Implementierung der VDA 5050 im Leitsystem auf mittelfristige Sicht trotzdem eine sinnvolle Erweiterung. Durch die kreative Verwendung der empfohlenen Datenstruktur oder entsprechende Ergänzungen der Richtlinie könnten alle notwendigen Informationen an den mobilen Roboter übermittelt werden und gleichzeitig ein Zeichen für die Etablierung von standardisierten Schnittstellen zwischen Leitsystem und FTF beziehungsweise Roboter gesetzt werden.

4.5.3 Präsentationsschicht

Die Implementierung der Benutzeroberfläche teilt sich in die Implementierung der graphischen Benutzeroberfläche und in die Implementierung der sprachbasierten Benutzeroberfläche auf. Die Entwicklungsumgebung setzt sich generell aus dem Codeeditor Visual Studio Code (Version: 1.46.1) von Microsoft und der Open Source Laufzeitumgebung node.js (Version: 12.16.3) zusammen.

Graphische Benutzeroberfläche

Die Implementierung der graphischen Benutzeroberfläche richtet sich nach dem verwendeten Frontend-Framework. Dabei wurde entsprechend der Anforderungen das Framework Vue gewählt. Besonders die einfache und schnelle Einarbeitung und Nutzung sowie die hohe Flexibilität des Frameworks führten zu dieser Auswahl. Darüber hinaus ist die gute Performanz und Interaktivität der mit Vue entwickelten Anwendungen ein weiterer Vorteil. Die Performanz ist ein Indikator für die Geschwindigkeit des Ladens und Nachladens der Anwendung. Zudem unterstützt das Framework die Paradigmen MVVM-Pattern, Responsive Design und die Integration einer REST API [Kal-2018]. Der Begriff Responsive Design umfasst verschiedene konzeptionelle und technische Ansätze, welche die Anpassung von Web-Oberflächen an das jeweilige Browserfenster ermöglichen. Mit diesem Ansatz kann eine Weboberfläche optimiert für Smartphones, Tablets oder Desktop-Computer dargestellt werden [Sha-2018]. Vue verwendet ein komponentenbasiertes Design. Dabei sind die Komponenten innerhalb der Seite oder innerhalb anderer Komponenten wiederverwendbar. Die Übersichtlichkeit des Codes und des API ist ebenfalls positiv hervorzuheben [Mül-2019]. Zur Entwicklung wurde die Programmiersprache JavaScript verwendet. Die Verwendung von JavaScript ermöglicht eine hohe Dynamik der Webanwendung und garantiert eine sehr flüssige Interaktion für den Nutzer. JavaScript ist die gängige Sprache für die dynamische Interaktion von Webanwendungen [Fis-2015; Bul-2019].

In Abbildung 4-12 ist die Softwarearchitektur der Anwendung dargestellt. Die Abbildung fokussiert das Frontend. Das Leitsystem als Backend wird in der Abbildung vereinfacht dargestellt. Das Frontend läuft als Web-Anwendung im Browser. Der Browser übernimmt dabei einen Großteil der Interaktion und Verarbeitung. Das führt zu einer guten Performanz der Anwendung. Dabei wird die Struktur der Anwendung in der Hypertext Markup Language (HTML)-Datei festgelegt. Diese Datei legt fest, wie die Baumstruktur des Document Object Model (DOM) im Browser gerendert wird. Für die Gestaltung der Anwendung wird die BootstrapVue-Bibliothek verwendet. Diese Bibliothek ist eine Kombination aus Bootstrap und Vue und enthält viele Komponenten, Direktiven, Icons und Plugins als verwendbare Codebeispiele. Vue wird für die dynamische Interaktion der Anwendung verwendet. Für die Validierung von Eingabedaten wird zusätzlich die Bibliothek Vuelidate verwendet. Über eine REST-API werden die Daten mit dem Backend über das Internet ausgetauscht. In einer REST-API werden die HTTP-Standardmethoden (GET/ PUT/ POST/ DELETE) verwendet, um eine Anfrage vom Client zu senden. Die Antwort des Servers liegt im XML-Format vor.

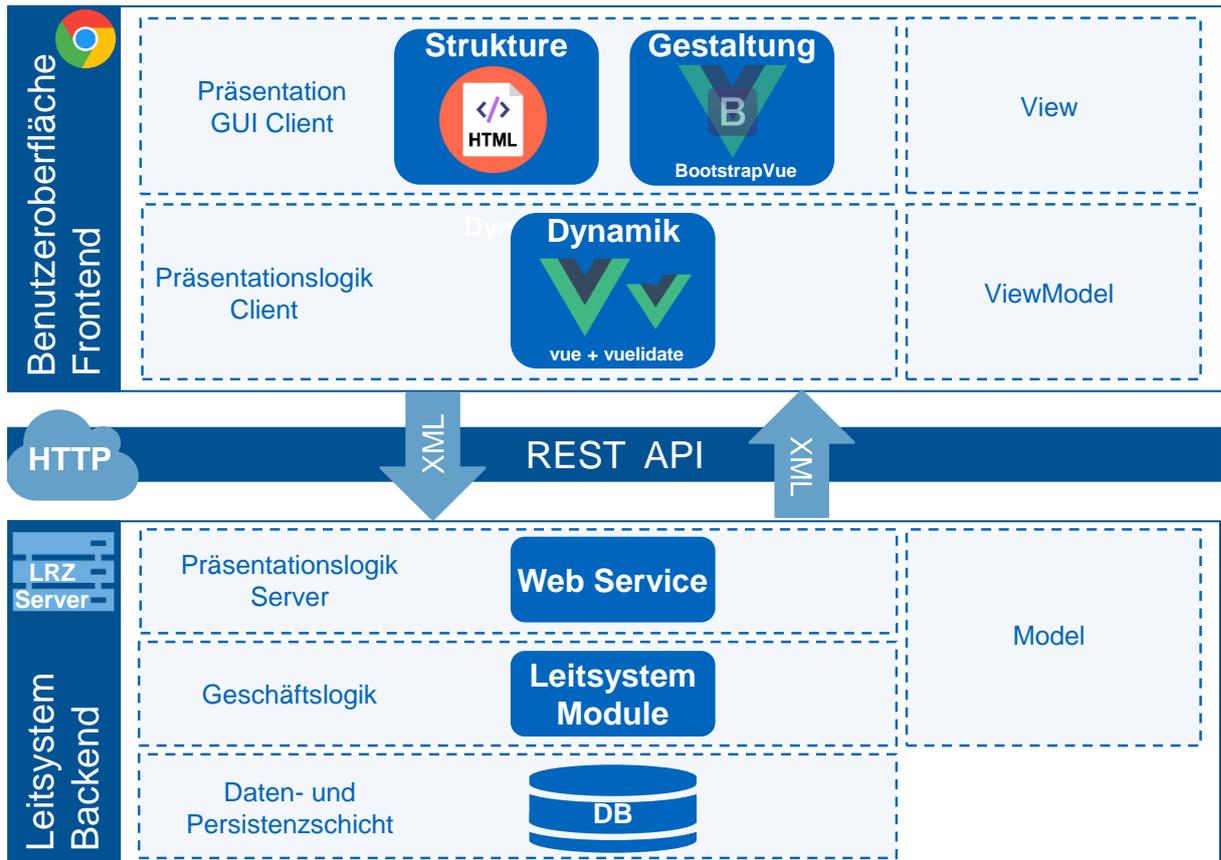


Abbildung 4-12: Softwarearchitektur des GUI

Der Entwicklungsprozess der Anwendung gliedert sich in vier Hauptschritte. Im ersten Schritt wurde das Projekt strukturiert, aufgesetzt und konfiguriert. Im nächsten Schritt wurden die GUI-Elemente entsprechend der Mock-Ups programmiert. Darauf aufbauend wurden die Funktionen für die Validierung der Eingabedaten entwickelt. Axios wurde verwendet, um Daten aus der REST-API zu konsumieren und anzuzeigen. Dabei wurde eine Bottom-up-Integration verwendet, bei der die einzelnen Funktionen in aufeinanderfolgenden agilen Iterationen programmiert, getestet und gedebugged wurden.

Eine Anwendung besteht aus vielen Ordnern und Dateien mit Textinhalten, Code, Stylesheets und Medien. Die Ordner und Dateien müssen in eine sinnvolle Struktur gebracht werden. Dazu gehört das Einbinden der Bibliotheken, Pakete und Abhängigkeiten. Die wichtigsten Bibliotheken sind Vue (Version: 2.6.11), BootstrapVue (Version: 2.2.0), Vuelidate (Version: 0.7.5), Vue CRUD (Version: 0.15.2) und Axios (Version: 0.19.0). Die verschiedenen Bestandteile der Anwendung wurden als Ordnerstruktur basierend auf den Hauptfunktionen und Mock-Ups erstellt.

Die Programmierung der Anwendung wurde mit der Entwicklung der Navigationsleiste begonnen, welche zwischen den verschiedenen Ansichten der Anwendung navigiert.

Weiter wurde die Startseite entwickelt, welche den Zugang zu den zentralen Inhalten der Anwendung ermöglicht. In der Abbildung 4-13 wird die Hauptseite (Home) dargestellt. Die Hauptfunktionen werden in flexiblen Inhaltscontainern, den sogenannten Cards, dargestellt.

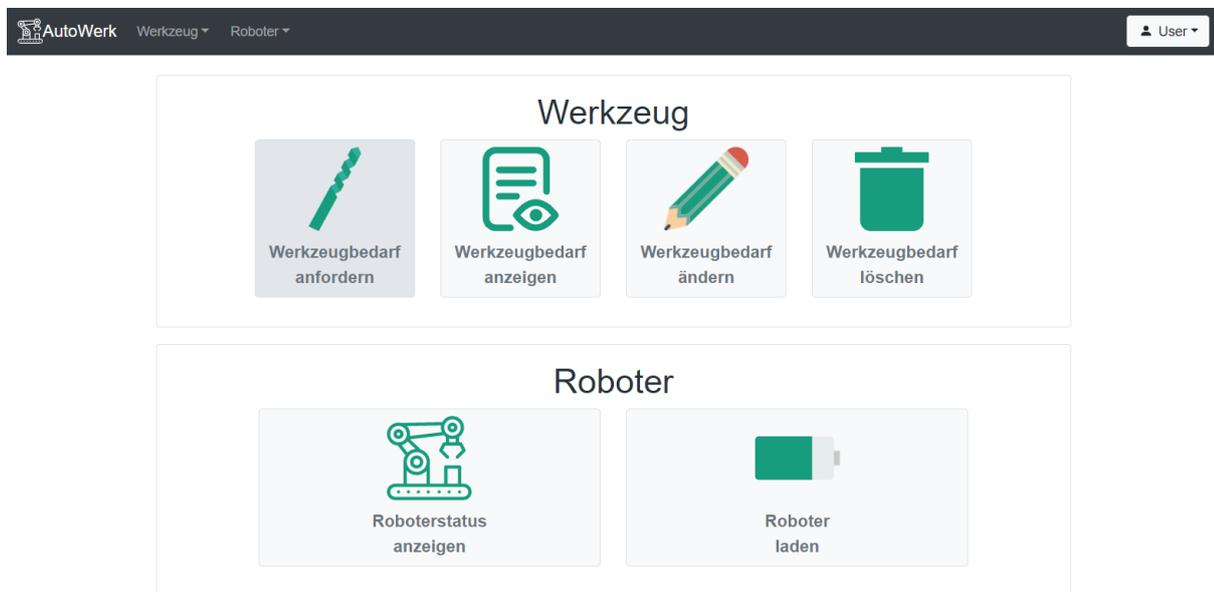


Abbildung 4-13: Hauptseite (Home) des entwickelten GUI

Weiter werden die einzelnen Hauptfunktionen entwickelt. In der Abbildung 4-14 ist die Oberfläche der Funktion *Werkzeugbedarf anfordern* dargestellt. Zunächst wurde dabei die grafische Gestaltung entwickelt. Für die meisten Funktionen müssen Daten über Eingaben der Werkskraft abgefragt, geändert, gelöscht oder angelegt werden. Dafür wurden entsprechende Eingabefelder angelegt und deren Eingabeformat definiert. Um sicherzustellen, dass Benutzer die richtigen Daten in die Eingabefelder eingeben, wurde eine Validierung der Dateneingaben implementiert. Dafür wurden Eigenschaften der Eingabedaten festgelegt, wie beispielsweise eine Mindestlänge und deren Datentyp. Zudem wurde definiert ob eine Eingabe zur Ausführung der Funktion benötigt wird oder optional ist. Die tatsächlichen Eingabewerte werden auf Basis dieser Eigenschaften geprüft. Wenn die Eingabe nicht mit den Eigenschaften übereinstimmt, erhält das Eingabefeld einen ungültigen Zustand und die Funktion kann nicht ausgeführt werden (siehe Abbildung 4-15). Wenn die Datenvalidierung bereits auf der Client-Seite im Browser stattfindet, wird verhindert, dass Datensätze mit falschen Datenformaten und fehlenden Daten an das Backend übertragen und in der Datenbank gespeichert werden. Vue und BootstrapVue beinhalten keine Formular- und Datenvalidierung, daher wurde das Plug-In Vuelidate verwendet. Der Datenaustausch zwischen dem Frontend und dem Backend (Leitsystem) erfolgt über eine REST-API.

The screenshot shows a web form titled "Werkzeugbedarf anfordern". At the top left is the "AutoWerk" logo with a navigation menu containing "Werkzeug" and "Roboter". At the top right is a user profile icon labeled "User". The form fields are as follows:

- Maschinennr.: 4012345000016
- Werkzeugtyp: Bohrer XYZ
- Durchmesser: Durchmesser in m
- Soll-Startzeitpunkt: tt.mm.jjjj
- Fertigungsauftrag: Fertigungsauftrag XYZ
- Grund: Bitte wählen Sie eine Option

At the bottom of the form are three buttons: « Zurück, Historie, and Weiter ».

Abbildung 4-14: Oberfläche der Hauptfunktion Werkzeugbedarf anfordern

This screenshot illustrates a validation error. The "Maschinennr." field contains the value "40123450000". A red border highlights the input, and a red error message "Muss min. 13 Zahlen haben" is shown below it. A dropdown menu is open, displaying three suggestions: "4012345000016", "4012345000029", and "4012345000032".

Abbildung 4-15: Validierung eines Eingabefeldes

Sprachbasierte Benutzeroberfläche

Für die Umsetzung des VUI wurde die Softwaretechnologie von Amazon Alexa® verwendet. Sprachassistenten beinhalten die nötigen Komponenten wie Spracherkennung (engl. Automatic Speech Recognition (ASR)), Sprachanalyse (engl. Natural Language Understanding (NLU)) und Sprachgenerierung (engl. Natural Language Generation (NLG)) zur Entwicklung eines VUI [Das-2018]. Die Systemarchitektur der Anwendung ist in Abbildung 4-16 dargestellt. Sprachassistenten bestehen aus zwei Teilen: Dem Interaktionsmodell (das Frontend) und dem Hosted Service (das Backend). Das Interaktionsmodell definiert, welche Funktionalitäten oder Verhaltensweisen die Anwendung beherrscht. Das Interaktionsmodell (Anwendungsfunktion) des VUI liegt in der Cloud von Amazon, damit der Sprachassistent darauf zugreifen kann. Der Hosted Service (Backend) ist die im Internet gehostete Programmlogik, welche auf die Anfragen eines Benutzers reagiert. Die benutzerdefinierte Programmlogik wurde auf der Amazon Web Services (AWS)-Lambda-Funktion von Amazon gehostet und ausgeführt. Durch AWS-Lambda kann Code ohne Administration, mit automatischer Skalierung, hoher Verfügbarkeit und konsistenter Leistung von Alexa® ausgelöst und ausgeführt werden. Dies erleichtert und beschleunigt die Implementierung. Zusätzlich gibt

es ein kostenloses Kontingent an Aufrufen der AWS-Lambda-Funktion. Über HTTP-Aufrufe einer REST-Schnittstellen wurde die benutzerdefinierte Logik mit dem AWS-Lambda eingebunden. Der Datenaustausch mit dem Leitsystem erfolgt über einen Uniform Resource Identifier (URI) und die Verwendung der HTTP-Standardmethoden.

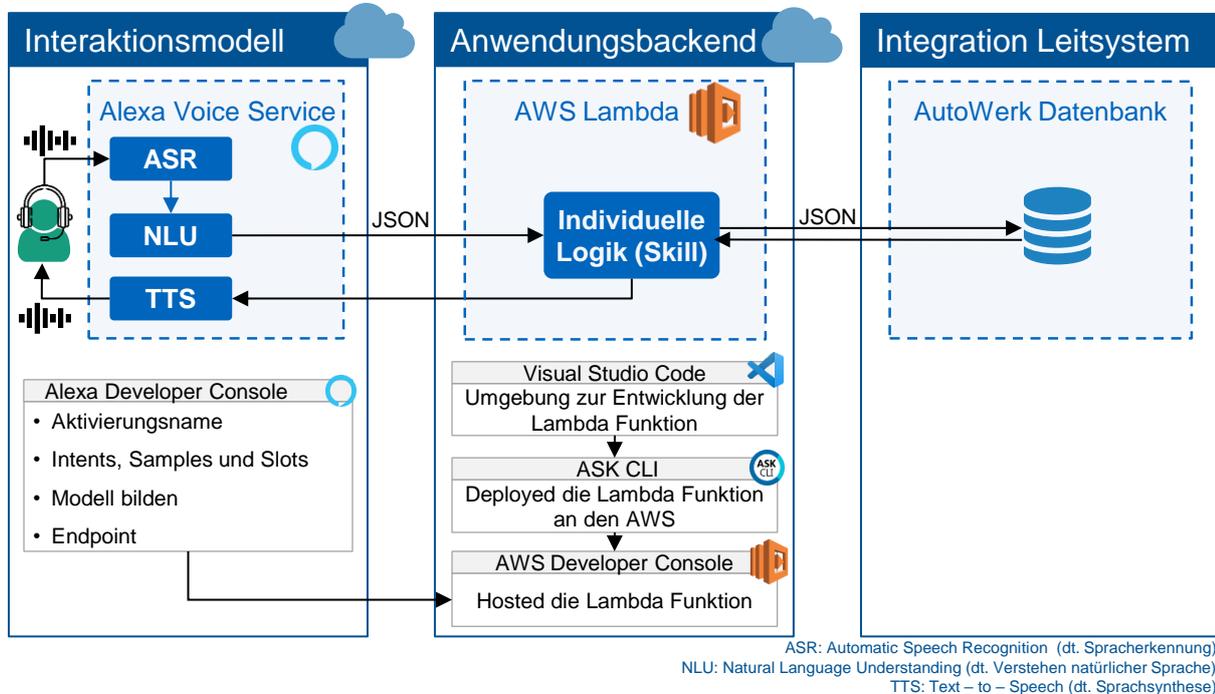


Abbildung 4-16: Softwarearchitektur des VUI

Zur Implementierung der Anwendung wurde zunächst die Entwicklungsumgebung aufgesetzt. Hierzu wurde das Alexa Skills Kit Command Line Interface (ASK CLI) (Version: 2.11.0) zur Verwaltung von Alexa® Skills und AWS-Lambda-Funktionen verwendet. Über das ASK CLI wurde der auf dem eigenen Rechner erstellte Quellcode an den Amazon Server bereitgestellt (deployed). Sobald komplexere Skills erstellt werden, wird die Verwendung des ASK CLI notwendig. Zusätzlich wurden Entwickleraccounts für die Amazon Alexa® Developer Console und für die AWS Console benötigt. In der Amazon Alexa® Developer Console beginnt die Implementierung des Interaktionsmodells auf Basis der erstellten Storyboards. Das Interaktionsmodell wurde entsprechend der Modellierung aufgebaut und die Intents und Beispielformulierungen übernommen. Simultan erfolgte die Implementierung der benutzerdefinierten Logik. Die benutzerdefinierte Logik wurde in der Programmiersprache JavaScript geschrieben und ist unter dem Link <https://github.com/njmlr/autowerkskill> abrufbar. In einem iterativen Vorgehen wurde die implementierte Logik und das Interaktionsmodell auf die entsprechende Funktionalität getestet, optimiert und erweitert. Hierfür bietet die Amazon Alexa® Developer Console eine Testumgebung an, in welcher direkt sprach- oder textbasiert das Interaktionsmodell, sowie auch die benutzerdefinierte Logik auf dem

eigenen Gerät getestet und gedebuggt werden kann. Die Testumgebung in der Amazon Alexa® Developer Console konnte gleichzeitig zum Testen der Usability verwendet werden. Die Aktivitäten zur Implementierung erfolgten in einem kontinuierlichen iterativen Prozess, bis zur gewünschten Funktionalität und Usability der Anwendung.

4.6 Implementierung des Kommunikationssystems

Die erarbeitete Methode zur Konzeption eines Kommunikationssystems für mobile Roboter in Produktionsumgebungen wurde angewendet und innerhalb des Demonstrators umgesetzt. Zur Erfassung der Kriterien wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, die Ergebnisse der Expertengespräche und Unternehmensbesichtigungen eingebunden sowie die Ausgangssituation im Forschungsprojekt analysiert. Die resultierenden Erkenntnisse wurden innerhalb einer Anforderungsanalyse priorisiert, evaluiert und dokumentiert. Basierend auf diesen Anforderungen wurde eine Untersuchung der Funktechnologien, Roboter Software Frameworks und Protokolle durchgeführt. Als Ergebnis erfolgt die Kommunikation nach dem Protokollstapel in Abbildung 4-17. Die Schnittstelle zwischen Anwendungsschicht und Leitsystem wurde über den Roboterorchestrierer realisiert. Das Roboter Software Frameworks Robot Operating System (ROS) bietet auf der anderen Seite eine einheitliche Schnittstelle zur internen Robotersteuerung. In der Netzwerkschicht wurde ein Wireless Local Area Network (WLAN) über den Standard IEEE 802.11ax aufgebaut, welcher auch am Fraunhofer IGCV über die WLAN Access Points verfügbar ist. Der mobile Roboter hat jedoch ein WLAN-Modul nach IEEE 802.11n integriert. Die IEEE 802.11ax Access Points sind zwar mit dem IEEE 802.11n Modul kompatibel, jedoch können die Vorteile von IEEE 802.11ax nicht genutzt werden. Hierzu wird ein IEEE 802.11ax Modul benötigt. Für die Umsetzung im Demonstrator reichen jedoch die Kenndaten von WLAN IEEE 802.11n aus. Auf der Internetschicht erfolgt das Routing und die Adressierung der Datenpakete über Internet Protocol Version 6 (IPv6). Die Datenpakete werden in der Transportschicht vom TCP zur entsprechenden Anwendung zugeordnet. Für eine sichere Übertragung der Daten kann das Transport Layer Security (TLS) zusätzlich auf der Transportschicht eingesetzt werden. Aufgrund des Implementierungsaufwands wurde auf das TLS im Demonstrator jedoch verzichtet. In der Anwendungsschicht erfolgt die Übertragung über das Übertragungsprotokoll MQTT.

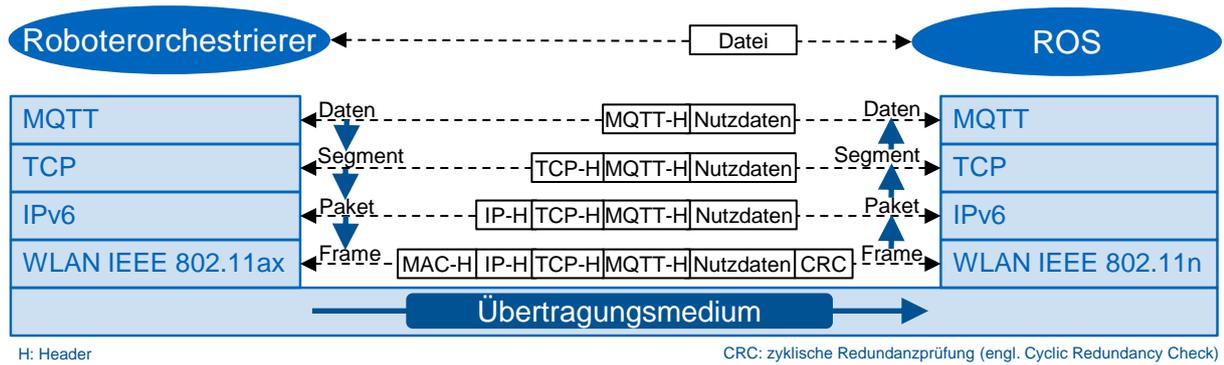


Abbildung 4-17: Protokollstapel nach TCP/ IP-Referenzmodell

4.7 Verifikation und Validierung des Leitsystems

Zum Abschluss des Kapitels soll ein kurzer Abriss über die Verifikation und Validierung des Leitsystems gegeben werden. Der Fokus dieses Abschnitts liegt dabei nicht auf Komponenten- und Integrationstests, die mittels gängiger statischer und dynamischer Methoden durchgeführt wurden, sondern auf dem Systemtest des Leitsystems als Ganzen. Die zentrale Herausforderung des isolierten Testens des Leitsystems stellte das Fehlen von Rückmeldungen seitens der mobilen Roboter sowie der umgebenden IT-Systeme dar. Um diese zu imitieren, wurden zwei unterschiedliche Methoden eingesetzt.

Zunächst wurden die Rückmeldungen durch die manuelle Eingabe der Informationen über die Benutzeroberfläche simuliert. Dieses Vorgehen bot gleichzeitig den Vorteil, dass auf diese Weise nicht nur Logikschicht, sondern auch Präsentationsschicht umfassend getestet werden konnte. Allerdings limitierte dieses Testszenario aufgrund des manuellen Aufwands die Testmöglichkeiten auf kleine Systeme. Für diese konnte auf Basis der Vorgehensweise das erwartete und angestrebte Verhalten des Leitsystems festgestellt werden.

Um die Funktionalität des Leitsystems auch in größeren Produktionssystemen zu verifizieren und validieren, wurde dem Software-in-the-Loop-Ansatz folgend eine Testumgebung in einem Werkzeug zur ereignisdiskreten Materialflusssimulation aufgebaut. Da die Simulation ereignis- und nicht zeitdiskret erfolgt, können in diesem Testszenario keine Aussage darüber getroffen werden, ob die Berechnungsgeschwindigkeit des Leitsystems für den Operativbetrieb ausreichend ist. Da dies jedoch vor allem in Hinblick auf den im Rahmen des Projekts umzusetzenden Demonstrators (siehe Kapitel 6) keinen kritischen Faktor darstellt, ist der Einfluss diese Einschränkung im Projektkontext weitestgehend irrelevant. Der Datenaustausch zwischen Leitsystem und Simulationssoftware erfolgt über Textdateien, die Befehle des Leitsystems und die

Antworten des Simulationsmodells enthalten. Angefangen wurden die Tests mit einem minimalen Simulationsmodell. Es enthält die notwendigen Elemente zur Simulation des Werkzeugkreislaufs – Werkzeuglager, das gleichzeitig die Funktionen der Werkzeugaufbereitung übernimmt, mobilen Roboter, Werkzeugmaschine sowie verbindende Wege – je einmal. Nach der Verifikation des Simulationsmodells sowie identischen Testergebnissen für eine Systemkonfiguration im manuellen und simulationsbasierten Test wurde das Simulationsmodell graduell erweitert. Abbildung 4-18 zeigt eine beispielhafte Systemkonfiguration in der Simulationssoftware. Das größte getestete Produktionssystem umfasste vier Roboter und 14 Werkzeugmaschinen und 250 Werkzeuge. Auch in diesem System erfüllte das Leitsystem seine Aufgaben entsprechend der Spezifikationen korrekt und konnte somit im nächsten Schritt in der demonstratorischen Umsetzung in einem realen System eingesetzt werden.

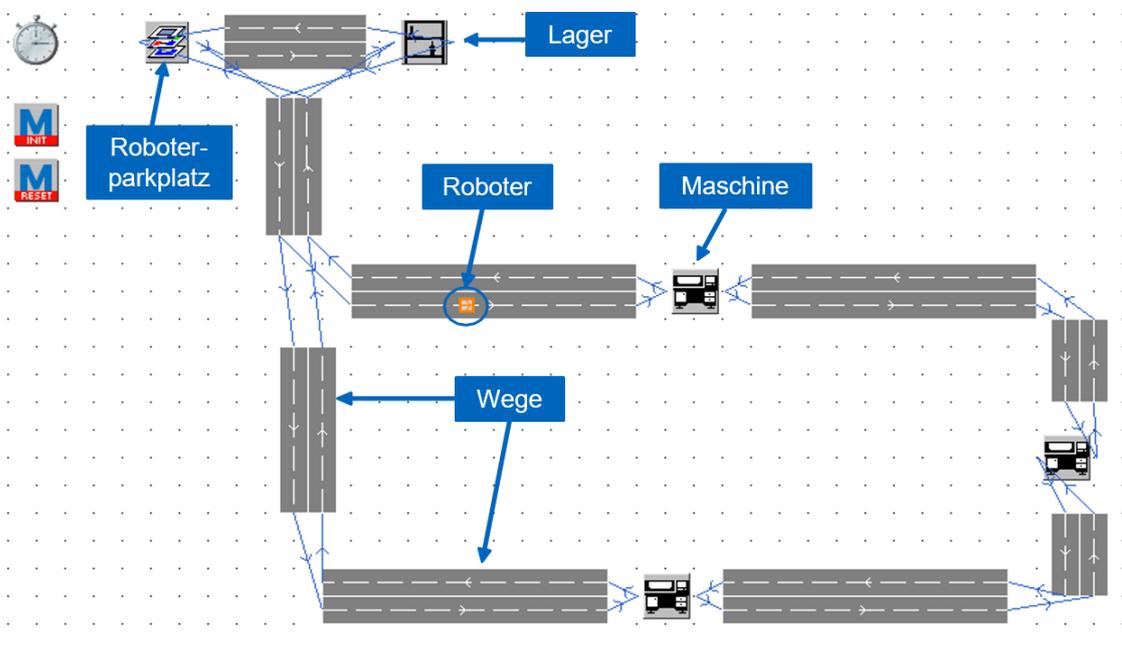


Abbildung 4-18: Simulationsmodell einer Testumgebung des Leitsystems [San-2020]

5 Gestaltung steuerungstechnischer und physischer Schnittstellen an Übergabepunkten

Verfasser: Christian Härdtlein

In diesem Kapitel werden die Gestaltung steuerungstechnischer und physischer Schnittstellen an Übergabepunkten anhand des mobilen Roboters Scout®active beschrieben, der für den Use Case (siehe Abbildung 6-1) und für den Aufbau des Demonstrators (siehe Kapitel 6) dient. Für den Einsatz des Scout®active in der Werkzeuglogistik waren unterschiedliche softwaretechnische und konstruktive Änderungen am mobilen Roboter durchzuführen. Zum einen wurde die Ansteuerung der Manipulationseinheit auf ROS (Robot Operating System) umgestellt, um eine externe Kommunikation zu ermöglichen. Zum anderen war eine konstruktive Anpassung bzw. Erweiterung des Greifsystems zur sicheren Handhabung verschiedener Werkzeuge notwendig. Zur Steigerung der Produktivität und Wirtschaftlichkeit wurde eine Transportkapazitätserweiterung implementiert.

5.1 Spezifikationen des mobilen Roboters Scout®active

Der mobile Roboter Scout®active wird von der Fabmatics GmbH, ehemals Roth & Rau – Ortner GmbH vertrieben. Dabei handelt es sich um einen säulenartigen Roboter, der die Reinraumklasse „ISO class 3/US FED class 1“ besitzt. Dadurch ist er insbesondere für Reinraumanwendungen, wie die Handhabung und den Transport von Waverkassetten in der Halbleiterfertigung geeignet, kann aber auch in anderen Produktionsumgebungen flexibel eingesetzt werden. Der Roboter besteht aus den beiden Hauptkomponenten, der mobilen Plattform SCITOS G5 der MetraLabs GmbH sowie dem Manipulator LWA 4P mit dem Endeffektor PG 70 der SCHUNK GmbH & Co. KG. Zusätzlich enthält der Roboter eine Signalsäule zur Anzeige des Betriebszustands und Roboterstatus sowie eine LED zur Anzeige des Ladezustandes. Des Weiteren besitzt er einen Touchscreen mit grafischer Benutzeroberfläche zur manuellen Bedienung und Informationsausgabe sowie einen Lautsprecher zur Übertragung von Warnungen und Hinweistönen. Unterhalb des 3D-Sensors ist eine 2D-Flächenkamera montiert. Die Montagefläche soll für den Werkzeugtransport befähigt werden. (Abbildung 5-1)

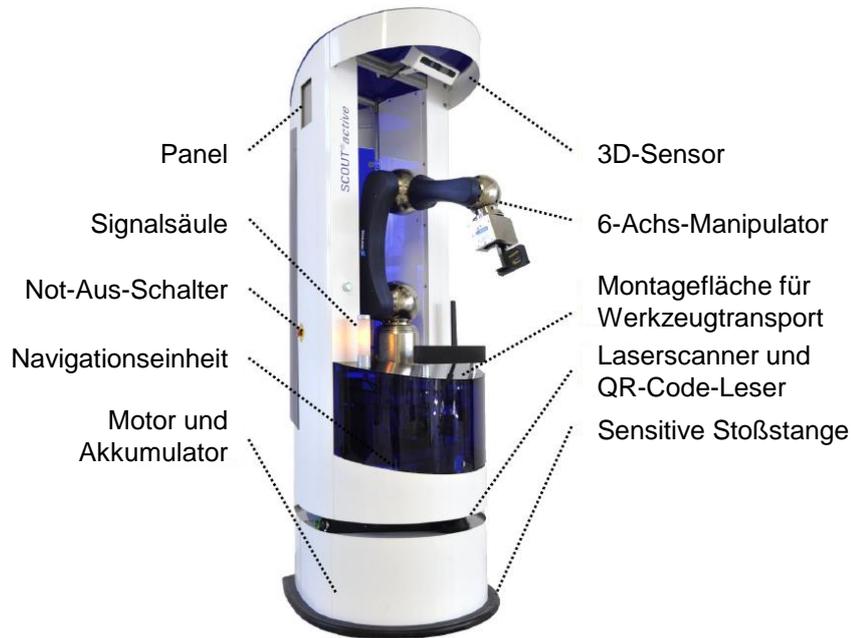


Abbildung 5-1: Mobiler Roboter Scout@active

5.1.1 Mobile Plattform

Die modular aufgebaute mobile Plattform SCITOS G5 besteht aus einem Differentialantrieb und einem Akkumulator. Dieser ermöglicht eine Laufzeit von bis zu 18 Stunden, bei einer maximalen Ladedauer von sechs Stunden. Die Planung der schnellsten und energieeffizientesten Trajektorie erfolgt anhand einer konfigurierbaren und durch Laserscanner aufgenommene Karte, die auch zur Selbstlokalisierung mittels natürlicher Landmarken dient. Zur optimalen Trajektorienplanung und Umgebungswahrnehmung sind an der Front- und Rückseite jeweils Laserscanner montiert. Zusätzlich ist auf Kopfhöhe des Scout@active ein 3D-Sensor angebracht, der die Personenerkennung und Kollisionsvermeidung mit erhöhten Gegenständen an der Front des Roboters unterstützt. Die letzte Sicherheitseinrichtung ist ein sensibler Stoßfänger, der bei Berührung die Systembewegung unterbricht. Für die exakte orthogonale Ausrichtung der Plattform vor einer Station ist der Scout@ extra mit Laserabstandssensoren ausgestattet. Mit dieser Kombination verschiedenster Technologien ist der Roboter in der Lage, autonom und ohne zusätzliche externe Führungssysteme in der Produktionsumgebung zu navigieren.

5.1.2 Industrierobotersystem

Der auf dem Scout@active montierte Manipulator ist der Powerball Lightweight Arm LWA 4P der Firma Schunk. Er besteht aus drei ERB Powerball Modulen, wodurch er sechs Freiheitsgrade besitzt, die durch den Endeffektor PG 70 auf sieben erhöht werden. Durch den Aufbau ist der Drehbereich der sechs Gelenke nicht identisch, um

Kollisionen der Gelenke vorzubeugen. Joint 3 hat nur einen Drehbereich von $\pm 155^\circ$, während die anderen Achsen jeweils um $\pm 170^\circ$ gedreht werden können. Die Winkelgeschwindigkeit ist jedoch bei allen Achsen identisch und beträgt bei Nennlast $72^\circ/\text{s}$. Die Traglast des Manipulators mit montierten Greifer liegt bei 5 kg bei 16 kg Eigengewicht. Für den Betrieb benötigt das Industrierobotersystem eine Spannungsversorgung von 24 V bei einem durchschnittlichen Stromverbrauch von 3 A und einem Maximalstrom von 12 A. Die Stromspitzen werden beim Starten des Roboters und bei Kollisionen erreicht. Ein ERB Modul enthält Komponenten wie Antrieb, Getriebe und Haltebremse für jeweils zwei Achsen. Außerdem ist die komplette Steuer-, Regel- und Leistungselektronik in die Module integriert. Gleiches gilt auch für den Greifer. Die Kommunikation und Ansteuerung der Hardware erfolgt über CANopen und wird ab Werk mit einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) der Firma Keba durchgeführt.

5.2 Ansteuerung des Industrierobotersystems mit ROS

Für die Umstellung der Steuerung des Manipulators von der Keba-SPS auf ROS wurde der small-form-factor (SFF) Computer NUC (Next Unit of Computing) von Intel verwendet. Er bietet die gleichen Funktionalitäten und Anschlüsse wie ein herkömmlicher Desktop PC und lässt sich auf dem mobilen Roboter unterbringen. Als Betriebssystem wird die Linux Distribution Ubuntu 14.04 und als Entwicklungsumgebung Visual Studio Code genutzt. Die installierte ROS Version ist Indigo Igloo. Des Weiteren wurden mehrere ROS Packages verwendet. Für die Verbindung zwischen PC und Manipulator werden neben der Hardware, dem CAN-USB-Adapter der Firma PEAK, die ROS Packages „schunk_robots“, „schunk_modular_robotics“ und „ros_canopen“ verwendet. Das erste Package dient der Konfiguration und zum Starten des Manipulators bzw. Endeffektors. Mittels des zweiten Packages kann auf die Schunk Hardware mit ROS-Messages, -Services und -Actions zugegriffen werden. Das dritte Package ermöglicht die generelle Verwendung von CANopen Geräten mit ROS, es bildet also die Schnittstelle zwischen Treiber des CAN-USB-Adapter und ROS. Die Nodes für den LWA 4P und den PG 70 werden aus dem Package „schunk_robots“ mit dem Befehl `roslaunch` gestartet. Danach wird über `rosservice` der Initialisierungsprozess angestoßen. Nach Abschluss dieses Vorgangs besteht eine Kommunikationsverbindung zu den einzelnen Modulen und das Industrierobotersystem ist betriebsbereit.

Für die Pfadplanung, den Kollisioncheck und die Ansteuerung über Moveit werden Dateien im *Universal Robot Description Format* (URDF) und im *Semantic Robot Description Format* (SRDF) benötigt. Die URDF-Datei beschreibt im XML Format die komplette Kinematik und Dynamik des Roboters sowie die visuelle Darstellung und

das verwendete Kollisionsmodell. Jeder starre Körper entspricht dabei einem Link, der durch die Abmessungen, Masse, Trägheit und den Ausgangspunkt spezifiziert wird. In diesem Fall werden die Abmessungen aus CAD-Dateien übernommen, können aber auch aus einfachen geometrischen Formen bestehen, den sogenannten *Shapes*. Verbunden werden die Links durch Joints, also Gelenke. Wichtigstes Merkmal ist die Art des Gelenks, die die Anzahl an Freiheitsgraden von null bis sechs festlegt. Beim LWA 4P sind alle sechs Gelenke um eine Achse rotatorisch mit einem oberen und unteren Limit, das auch festgelegt werden muss. Des Weiteren ist es notwendig, einen Ursprungskörper (*parent link*) und einen Folgekörper (*child link*) anzugeben, wie auch die Lage und Ausrichtung des Joints. Dadurch werden die Links passend positioniert. Außerdem wird eine Grenze für die Geschwindigkeit und Beschleunigung benötigt. Soll zudem eine physikalische Simulation in Gazebo stattfinden, ist die Angabe der Dämpfung und Reibung nötig, da die URDF-Datei auch dafür verwendet wird. Um die URDF-Datei kürzer und besser lesbar zu gestalten, wurde das „Xacro“ Package verwendet, das eine XML Makrosprache ist. Dieses Dateiformat wurde auch für die Verknüpfung des Manipulators LWA 4P mit dem Greifer PG 70 verwendet, da diese Dateien jeweils nur einzeln vorliegen. Für die Verknüpfung wurde der letzte Körper des Manipulators, der Arm 6 Link, mit dem Greifer über den Joint 6 verbunden. Zusätzlich wurde die URDF-Datei des Greifers um die Backen erweitert. Damit der Roboter mit MoveIt verwendet werden kann, wird der MoveIt Setup Assistant benutzt. Dieser erzeugt neben anderen Dateien auch die SRDF-Datei des Roboters, die auch im XML Format gehalten ist. Um die Generierung zu starten, muss die URDF-Datei in die Anwendung geladen und eine Konfiguration durchgeführt werden. Nach dem Festlegen diverser Parameter erzeugt der Assistant verschiedene Dateien. Mit diesen ist es nun möglich, nach dem Verbindungsaufbau MoveIt für den mobilen Roboter zu verwenden und in der Visualisierungssoftware RViz darstellen zu lassen. Die Bedienung erfolgt dabei über die Markierungen am Endeffektor, indem die gewünschte Zielpose eingestellt wird (Abbildung 5-2 links). Alternativ findet die Ansteuerung auch über ein Terminal, den „MoveIt Commander“, oder einen anderen Node statt. Bei der Verwendung der grafischen Oberfläche werden dem Anwender direkt Kollisionen mit sich selbst bzw. der Umgebung angezeigt, indem die kollidierenden Elemente die Farbe auf Rot ändern (Abbildung 5-2 rechts). Die Umgebungsinformationen können aus Sensordaten (*Occupancy Map*) generiert oder manuell hinzugefügt werden. Letzteres wurde für das Gehäuse des Scout®active implementiert, damit der LWA 4P nicht mit diesem kollidiert. Nachgebaut wurde das Gehäuse aus mehreren Shapes. Die Verwendung von CAD-Daten wäre auch hier wieder möglich, jedoch sollten die Oberflächen zuvor vereinfacht werden, was die Rechenzeit deutlich verringert.

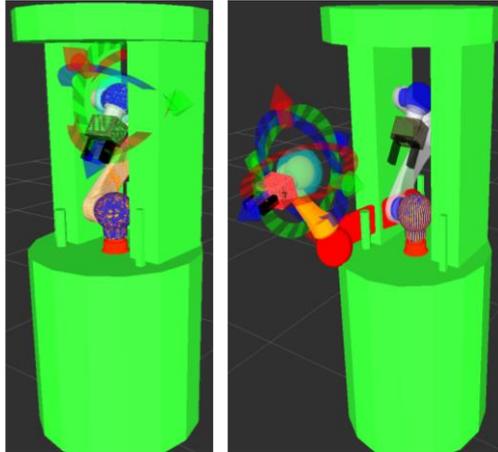


Abbildung 5-2: Zielposenplanung (links) Schunk LWA 4P & PG 70 mit nachgebildeten Gehäuse des Scout®active und farblich markierter Kollisionsprüfung (rechts) in rviz

Nach der Eingabe der Zielpose wird vom *Move Group* Node eine *Motion Plan Request* an die *Planning Pipeline* gesendet. Diese Anfrage enthält neben der Zielpose, die aktuelle Pose des Roboters, Inhalte der URDF und SRDF-Dateien sowie Umgebungsinformationen, die *Planning Scene*. Diese Informationen werden dem *Collision Detection* und *Planning Interface* Plugin bereitgestellt. Dabei werden die durch die verwendete OMPL gefundenen Trajektorien auf Kollisionen überprüft. Wenn ein möglicher Pfad gefunden wurde, wird dieser an den *Move Group* Node gesendet. Dabei kann es passieren, dass eine kollisionslose Zielpose eingegeben wird, aber aufgrund der Kinematik des Roboters in Kombination mit den Kollisionsobjekten der Umgebung keine ausführbare Trajektorie gefunden wird. Ist jedoch ein möglicher Pfad vorhanden, wird dieser über den *Trajectory Execution Manager* Client-Node an den *Follow Joint Trajectory Action* Server-Node des Roboters gesendet. Diese steuert wiederum die Controller an, wodurch die Trajektorie ausgeführt wird.

Zu Testzwecken wurde ein Node für den am Scout®active vorhandenen 3D-Sensor Xtion PRO von Asus erstellt. Die daraus resultierende Punktwolke ist in Abbildung 5-3 zu sehen.

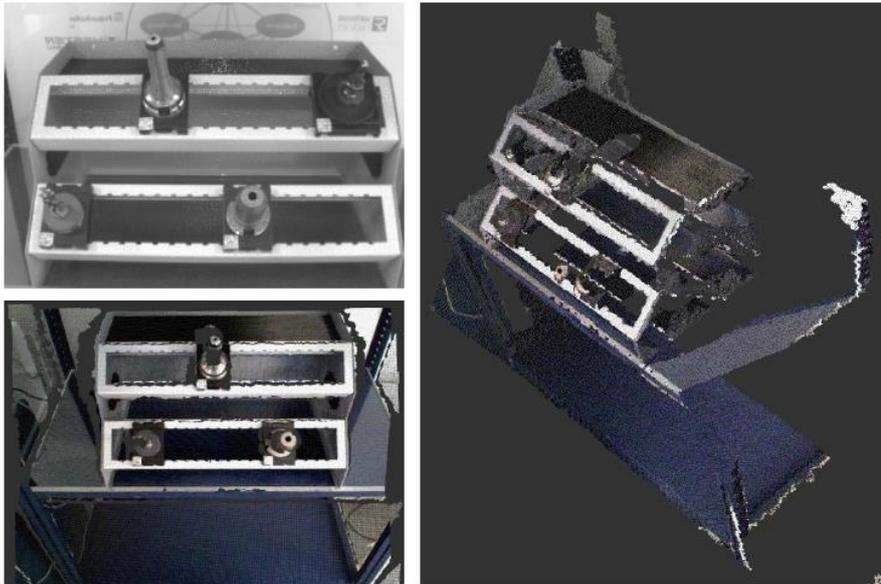


Abbildung 5-3: Punktwolke des Lagers (oben 2D-Front, unten 3D-Front, rechts 3D-seitlich)

Dabei können die einzelnen Konturen des Werkzeuglagers und der verschiedenen Werkzeugaufnahmen erkannt werden. Um die Sensordaten jedoch sinnvoll als Kollisionsobjekt für die Bahnplanung nutzen zu können, müssen diese mit dem Koordinatensystem des Scout®active bzw. des LWA 4P synchronisiert werden. Problematisch ist außerdem, dass es sich um eine USB-Kamera handelt, diese also nur Daten an einen Empfänger übermitteln kann. Dadurch wäre eine gleichzeitige Nutzung des 3D-Sensors nur denkbar, wenn die Verbindung mit einem per Software steuerbaren USB-Switch vom Rechner der mobilen Plattform auf den NUC und wieder zurückgeschaltet werden kann. Dies könnte z. B. passieren, nachdem sich der Scout®active erfolgreich an einer Station referenziert hat, um anschließend seinen Handhabungsvorgang mithilfe der 3D-Kamera durchzuführen. Danach wird die Kamera wieder für die Navigation freigegeben. Für ein neues Robotersystem empfiehlt sich jedoch die Verwendung eines netzwerkfähigen 3D-Sensors mit Ethernet Schnittstelle.

Als Testwerkzeuge stehen die SK40-, HSK63- und VDI16-Werkzeugaufnahmen zur Verfügung. Die Lagerplatzeinsätze sind versetzt angeordnet, um das Greifen von vorne zu ermöglichen. Gewählt wurde dieses Lagersystem, da es zur Demonstration der grundlegenden Funktionsweise des Systems geeignet ist. Außerdem sind die Einsätze flexibel versetzbar und durch ihren Aufbau auch mit einem Roboter handhabbar. Für den demonstratorischen Aufbau werden ausschließlich die Lagerplätze der Werkzeuge identifiziert. Das liegt zum einen an der Anbringung der DMC am Werkzeugschaft und die durch die Aufnahme vorgegebene Ausrichtung zu Kamera, wodurch die DMC nicht erkennbar sind. Zum anderen können die DMC auch bei passender Ausrichtung, wegen des großen Abstandes von Kamera zu Werkzeug, nicht gelesen werden. Markiert werden die Lagerplätze mit QR-Codes, da dafür eine größere Auswahl

an Open Source Algorithmen verfügbar ist. Zur Erkennung der QR-Codes wird die 2D-Flächenkamera acA780-75GM von Basler verwendet. Die Kamera dient als Ersatz zur vorhandenen Kamera, AT-200GE von JAI, die nicht mit Linux kompatibel ist. Dementsprechend sind wichtige Parameter der Kamera und des Objektivs, wie u. a. die Brennweite, der Öffnungswinkel und der Arbeitsabstand, nicht explizit für dieses System ausgelegt. Für die Ansteuerung der Kamera wird das „pylon_camera“ Package verwendet. Die Bilddaten werden vom „zbar_ros“ Package empfangen sowie der Text der gefundenen und entschlüsselnden QR-Codes ausgegeben. Die Lagerplatzpositionen sind dabei mit festen Koordinaten hinterlegt, welche vom Manipulator über definierte Bewegungsabläufe angefahren werden. Zum Greifen der Werkzeuge werden formschlüssige Greiferbacken verwendet, die an einer Station automatisiert durch den mobilen Roboter gewechselt werden können (siehe Kapitel 5.3). Für das selbstständige Bestimmen von Zielkoordinaten muss wie beim 3D-Sensor das Koordinatensystem der 2D-Kamera mit dem des Manipulators synchronisiert werden.

Für den Vorgang der Referenzierung des Scout@active wird eine Karte des Testgebietes durch manuelles Verfahren des Roboters von einem festgelegten Nullpunkt aufgenommen, welcher zu diesem Zweck in einem speziellen Aufnahmemodus agiert. Die Karte wird Anschluss bearbeitet, indem Aufnahmebereiche mit schlechter Qualität ausgebessert werden. Die Präzision beim Aufnehmen und Bearbeiten der Karte hat wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Selbstlokalisierung sowie der Navigation und damit auch auf die Referenzierung. Für die Referenzierung muss im Falle des Scout@active eine spezielle Vorrichtung mit geometrischem Körper und QR-Code verwendet werden. Die Position der Station wird eingelernt, indem der Roboter manuell vor der Station positioniert wird. Durch Ausführen des Stationenteachings werden die aktuellen Koordinaten der aufgenommenen Karte mit den Daten des QR-Codes und der geometrischen Form verknüpft. Anschließend kann der Scout@active über den Touchscreen oder eine TCP/IP-Schnittstelle zu der Station geschickt werden, um dort anzudocken und seine Aktionen auszuführen. Die Vorrichtung und das Stationenteaching wird an jedem Übergabepunkt benötigt.

5.3 Automatisiertes Greiferwechselsystem

In Abschnitt 3.4.1 wurde die Anforderung R07.1: „Roboter muss Endeffektor entsprechend des Werkzeugs wechseln können“, formuliert. Nachfolgend wird daher die Konzeptionierung und Implementierung eines automatischen Greiferwechselsystems, bestehend aus Wechselbacken und Greiferstation, beschrieben. Im Vorfeld wurde hierfür eine Patentrecherche durchgeführt, um zu überprüfen, ob bereits Konzepte eines automatisierten Greiferwechselsystems existieren, die als Basis dienen können. Das Ergebnis

der Patentrecherche ist in Tabelle 5-1 dargestellt. Es sind mehrere Konzepte bekannt, die einen Austausch von Greiforganen ermöglichen. Die Backen können dabei in einem Magazin abgelegt und aufgenommen werden. Zur Arretierung der Backen am Greifer werden Federelemente oder eine formschlüssige Verbindung durch eine Verriegelung erzeugt. Diese Verriegelung kann mit einem Bolzen oder Querkeil erfolgen. Das Lösen und Befestigen der Greiferbacken am Greifer erfolgt ohne zusätzliche Antriebsaggregate. Um die Backen vom Greifer zu lösen, verwenden die Konzepte die Aktorik des Greifers oder Roboters, während die Backen im Magazin verbleiben.

Tabelle 5-1: Patentrecherche für automatisierte Greiferwechselsysteme

Bezeichnung	Patentnummer	Jahr	Beschreibung
Auswechselbare Greiferfinger	DD000000226826 A1	1985	Beim Schließen der Greiferbacken fahren diese aufeinander zu, bis sie vollständig geschlossen sind. Dadurch werden die federbelasteten Arretierungsstifte aus der Arretierung gedrückt. Die Greiferbacken werden dabei im Magazin fixiert, sodass der Greifer diese dort ablegen und lagern kann.
Einrichtung zum automatischen Wechsel von Greiforganen	DD000000252343 A1	1987	Durch die Greiferschließbewegung werden die Greiforgane mit ihren dafür vorgesehenen Nuten auf die Schienen eines Magazins geschoben. Dabei werden durch den Anschlag Riegel gegen die Kraft einer Feder gelöst und der Greifer kann nach oben fahren, während die Greiforgane im Magazin verbleiben.
Wechseleinrichtung für Greiforgane	DD000000253971 A1	1988	Greiforgane werden mit den am Greifer befindlichen Greiforganführungen formschlüssig mittels eines Zapfens und einer Bohrung verbunden. Die Verbindung in axialer Richtung wird durch Federelemente gegeben, die durch eine Vorrichtung aufgespreizt werden können und dabei von den Greiforganführungen gelöst werden können.
Greifer für Werkstücke	DE000003513893 A1	1986	Greiferbacken können mittels Schnellwechsellkupplung und eines entsprechenden Magazins gewechselt werden. Die Sicherung erfolgt durch eine Rastkugel, die in eine Ringnut eines Kuppelungsschaftes eingreift.
Automatisches Wechselsystem für Greifer	DD000000239756 A1	1986	Zwischen Greifer und Grundbacken wird ein allseitiger Formschluss hergestellt. Die Anschlussstelle ist zwischen beiden als horizontale T-Nut ausgebildet und beide werden durch einen Querkeil in ihrer Lage gehalten. Dieser Querkeil kann mittels eines Querstegs angehoben und die Verbindung dabei gelöst werden.
Automatisches Wechselsystem für Greifer	DD000000239755 B1	1986	Der Greifer wird durch eine geeignete Roboterbewegung in den entsprechenden Achsen so verfahren, dass die Ansätze der Greiferbacken mit den Ausnehmungen des Magazins fluchten. Der Formschluss wird mit Bolzen gewährleistet, die durch Anschläge, welche auf dem Quersteg angebracht sind, verschoben werden.

Die identifizierten Konzepte fanden bei der Entwicklung des automatisierten Greifsystems Berücksichtigung. Das Ziel war es, eine möglichst kostengünstige, einfache und modulare Lösung zu entwickeln, um formschlüssige Wechselbacken in einem Magazin zu lagern, die von einem mobilen Roboter in Abhängigkeit des handzuhabenden Werkzeugs gewechselt werden können. Der verwendete Greifer des Scout®active bzw. des Manipulators Powerball Lightweight Arm LWA 4P ist ein 2-Finger-Parallelgreifer (PG 70) der Firma Schunk, welcher elektrisch angetrieben wird. Er besitzt einen Hub von 34 mm pro Backe und eine maximale Greifkraft von 200 N (Abbildung 5-4).

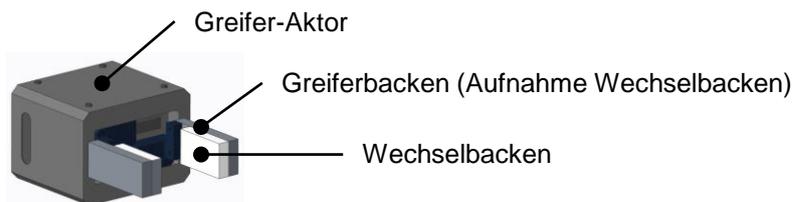


Abbildung 5-4: Greifsystem (Schunk PG 70) und dessen Einzelkomponenten

Die Wechselbacken sollen durch vollständiges Schließen der Greiferbacken im Magazin abgelegt bzw. aufgenommen werden können, d. h. die Greiferstation muss eine Vorrichtung besitzen, um Wechselbacken durch Verfahrbewegungen des Manipulators zu fixieren. In Abbildung 5-5 ist das Grundkonzept des Backenwechsels dargestellt.

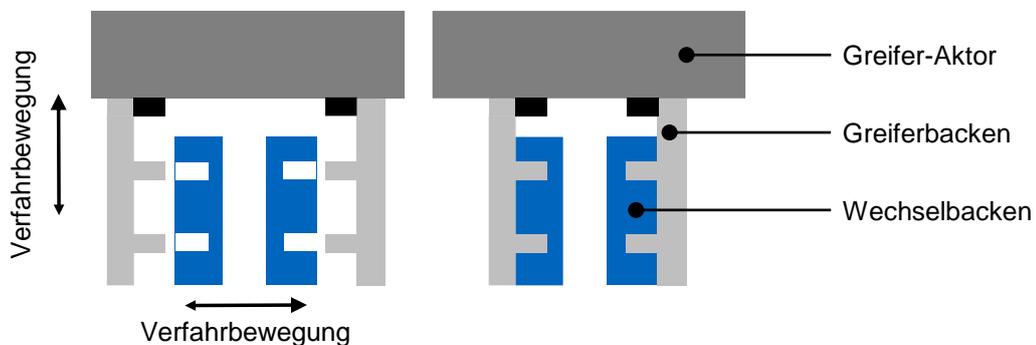
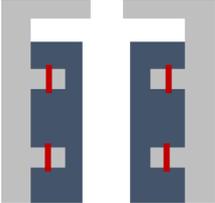
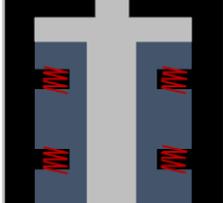
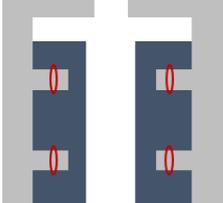
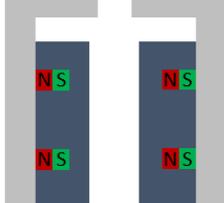


Abbildung 5-5: Grundkonzept des Backenwechsels

Um die Greiferbacken beim Aufnehmen und Wechseln zu arretieren und somit ein unbeabsichtigtes Lösen zu vermeiden, wurden verschiedene Konzepte erarbeitet. Tabelle 5-2 veranschaulicht die verschiedenen Lösungen und bewertet diese jeweils nach Vor- und Nachteilen. Im Allgemeinen soll der Greifer im geöffneten Zustand in eine Vorrichtung fahren und durch Schließen der Greiferbacken daraufhin die Wechselbacken aufnehmen bzw. durch Öffnen ablegen. An den Wechselbacken werden Aussparungen, wie zum Beispiel Bohrungen, vorgesehen. In diese können die Grei-

ferbacken beispielsweise mit Stiften einfahren und somit die Wechselbacken aufnehmen. Durch Gegeneinanderpressen der Wechselbacken beim Greifen eines Objekts ist ein Lösen der Wechselbacken von den Greiferbacken ausgeschlossen. Wenn allerdings kein Objekt gegriffen wird und die Wechselbacken keinen Widerstand haben, müssen diese zusätzlich fixiert werden.

Tabelle 5-2: Konzepte zur Arretierung der Wechselbacken

	Querbolzen	Federelement	O-Ring	Magnetisch
				
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Sichere Fixierung Geringer Verschleiß 	<ul style="list-style-type: none"> Einfache Bauweise Kostengünstig Einfacher Wechselvorgang Geringer Verschleiß 	<ul style="list-style-type: none"> Minimale Kosten Einfach Bauweise 	<ul style="list-style-type: none"> Kostengünstig Nahezu verschleißfrei Einfache Bauweise
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Schwierige Umsetzung Aufwendiger Fertigungsprozess Großer Platzbedarf Komplizierter Wechselvorgang 	<ul style="list-style-type: none"> Schwierige und keine absolute Arretierung der Greiferbacken 	<ul style="list-style-type: none"> Schwierige und keine absolute Arretierung der Greiferbacken Hoher Verschleiß 	<ul style="list-style-type: none"> Anfällig für Verschmutzungen

Das erste Lösungskonzept basiert dabei auf einer formschlüssigen Verriegelung, die durch einen Bolzen oder Keil realisiert wird. Wenn die Greiferbacken geschlossen werden und dabei in die Wechselbacken einfahren, sollen diese durch einen Bolzen gesichert werden. Dieses Verriegelungselement wird beweglich gelagert und kann durch eine geeignete Roboterbewegung in den entsprechenden Achsen verschoben werden. Dadurch kann die Arretierung der Backen gesichert und entsperrt werden.

Eine weitere Methode wäre, eine Arretierung durch Federelemente zu gewährleisten. Dies könnte beispielsweise wie bei einer gewöhnlichen Ratsche geschehen, die mit verschiedenen Stecknüssen bestückt werden kann und diese dabei durch ein Federelement fixiert werden. Durch eine Feder kann somit eine Kugel in eine Aussparung der Wechselbacke gedrückt werden und damit für den erforderlichen Halt sorgen. Durch das Öffnen und Schließen des Greifers wird die benötigte Kraft aufgebracht, mit der sich die Feder entsperren lässt.

Die dritte Lösung setzt auf einen O-Ring, der aus Gummi besteht. Dieser wird an den Stiften der Wechselbacke-Aufnahmen montiert und kommt als Dichtung zum Einsatz. Er schließt die Spalte, die zwischen dem Stift der Aufnahme der Bohrung Wechselbacke entsteht, formschlüssig ab. Dadurch können die Wechselbacken am Greifer haften und nur durch eine eingeleitete Kraft gelöst werden.

Der Grundgedanke des letzten Konzepts ist eine Fixierung der Wechselbacken durch eine magnetische Vorrichtung. Dabei sollen die Wechselbacken magnetische Einsätze enthalten, um die Wechselbacken magnetisch anzuziehen und dabei ein ungewolltes Lösen zu vermeiden. Allerdings müssen diese Wechselbacken aus ferromagnetischen Materialien bestehen.

Durch die Analyse der Vor- und Nachteile erarbeiteter Lösungen ist das Konzept mit magnetischen Elementen am geeignetsten zu bewerten. Der einzige Nachteil ist, dass eine evtl. Verschmutzung zu Beeinträchtigungen führen kann.

Für die Fixierung der Wechselbacken in der Greiferstation wurden zwei mögliche Konzepte betrachtet und bewertet (Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Konzepte zur Fixierung der Wechselbacken

	Stiftverbindung	Schienenverbindung
Vorteile		<ul style="list-style-type: none"> • Einfache Fertigung • Keine Zusatzkomponenten notwendig
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> • Zusatzkomponenten (Stifte) erforderlich • Hohe Präzision bei der Fertigung erforderlich 	

Eine Schienenverbindung, d. h. eine durch konstruktive Auslegung formschlüssige Verbindung zwischen Wechselbacken und Greiferstation, erscheint vor dem Hintergrund der einfachen Fertigung und der nicht benötigten Zusatzkomponenten gegenüber der Stiftverbindung als geeignet. In diesem Fall müssen die Wechselbacken eine Nut enthalten, die wiederum die negative Gegenform der Schiene ist.

Um eine möglichst einfache Fertigung und einen modularen Aufbau der Wechselbacken für unterschiedliche Werkzeuggeometrien zu ermöglichen, wurde der in Abbildung 5-6 dargestellte Prozessablauf entwickelt. Nach Vermessung der Werkzeugform bzw. der Greifpunkte bzw. Analyse entsprechender Datenblätter und Normen können die Daten in ein CAD-Dummy-Modell eingepflegt werden. Hierbei wurde in Catia V5 eine Vorlage erstellt, in der ausschließlich die Abmessungen der Werkzeugkontur einzutragen sind. Nach Umwandlung des CAD-Modells in eine stl-Datei kann die additive Fertigung der Greiferbacken durchgeführt werden. Alternativ kann die Herstellung der Wechselbacken auf einer Fräsmaschine erfolgen. Abschließend sind die Wechselbacken an die Greiferbacken zu montieren. Im Rahmen des Projekts wurde eine magnetische Verbindung gewählt. Hierbei sind die Greiferbacken mit Magneten und die Wechselbacken mit einem entsprechend ferromagnetischen Material auszustatten. Der letzte Prozessschritt zeigt, dass über eine Schraubverbindung fixierbare Rundmagnete ausgewählt wurden. Die Wechselbacken enthalten eine Senkkopfschraube, die als Gegenstück der Rundmagnete fungiert und somit eine lösbare Verbindung zwischen Wechselbacke und Greiferbacke darstellt.

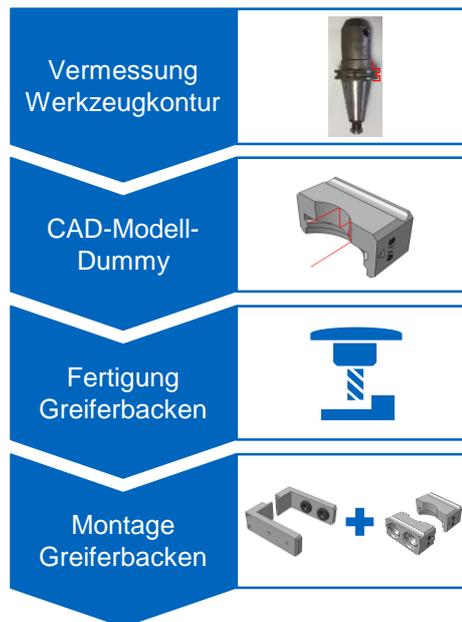


Abbildung 5-6: Prozessablauf zur Herstellung von Wechselbacken

Neben den Wechselbacken wird eine Greiferstation mit der nach Tabelle 5-3 ausgewählten Schienenverbindung benötigt. Hierbei ist darauf zu achten, dass die Abstände der Schienen dem minimalen Hub des Greifer-Aktors entsprechen. Zusätzlich wurde zur Detektion der verschiedenen Greiferbacken (für HSK63, SK 40 und Morsekegel) durch den Roboter die Möglichkeit zur Anbringung von QR-Codes geschaffen. Außerdem wurde die Greiferstation so gestaltet, dass diese in horizontaler Richtung modular erweiterbar ist (Abbildung 5-7).

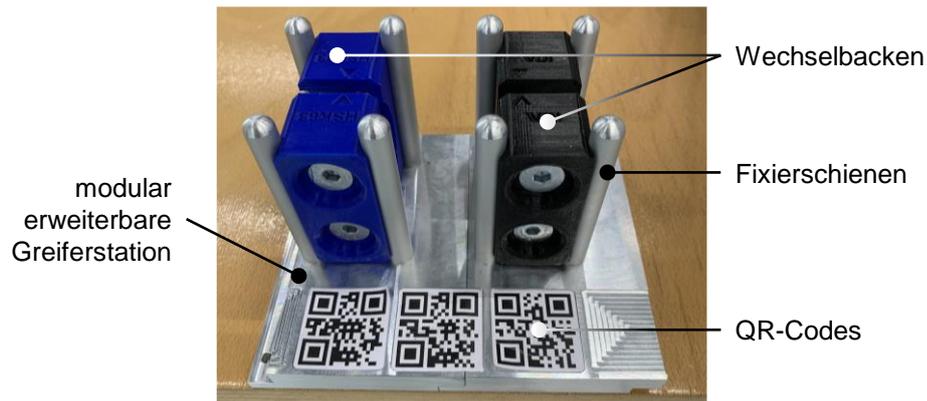


Abbildung 5-7: Modular erweiterbare Greiferstation

Der finale Ablauf der Ablage der Wechselbacken (hier HSK63) in die Greiferstation ist in Abbildung 5-8 dargestellt. Im ersten Schritt wird der Greifer-Aktor über der Greiferstation positioniert. Anschließend wird der Greifer komplett geschlossen (Schritt zwei) und im dritten Schritt vertikal und linear nach unten gefahren. Die Wechselbacken, die mit einer Nut versehen sind, werden dabei in die Schienen geführt und somit geklemmt. Durch Öffnen des Greifers im vierten Schritt werden die magnetischen Wechselbacken von den Greiferbacken getrennt und somit in der Station abgelegt. Nach linearem Verfahren des Greifers in vertikaler Richtung nach oben (Schritt fünf) können andere Wechselbacken wie z. B. für SK 40-Werkzeugaufnahmen aufgenommen werden. Die Aufnahme der Wechselbacken aus der Greiferstation erfolgt in umgekehrter Reihenfolge.

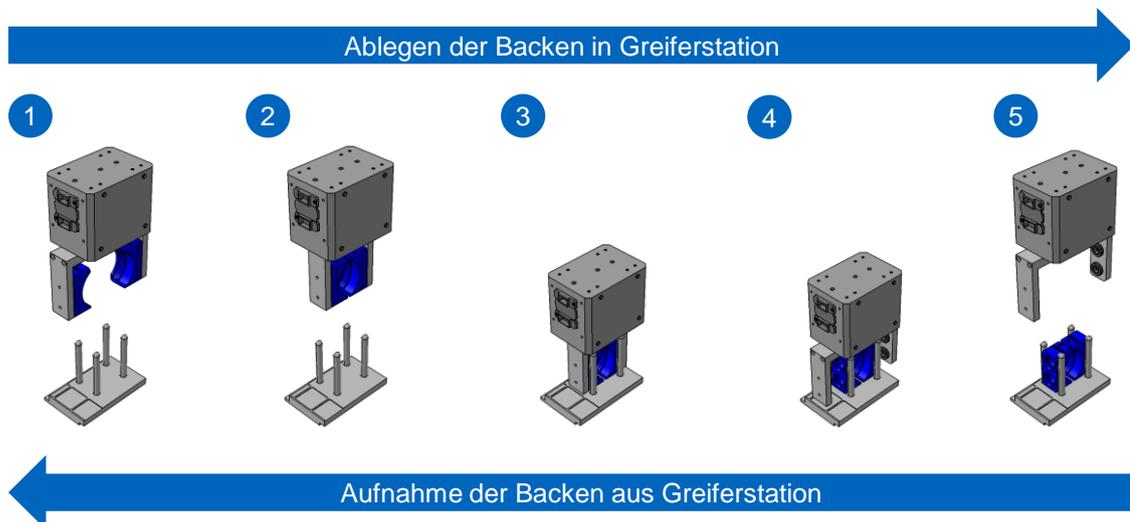


Abbildung 5-8: Ablage und Aufnahme der Backen in Greiferstation

5.4 Erweiterung der Transportkapazität

In seinem Ausgangszustand kann der mobile Roboter Scout®active ein Werkzeug (im Greifer) transportieren. Um eine Erhöhung der Produktivität durch Reduzierung von Transportfahrten und dadurch eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit herbeizuführen, wurde eine Erweiterung der Transportkapazität des Scout®active bzw. ein sog. Bauchladen implementiert. Die Anforderungen bestanden darin, unterschiedliche Werkzeuge transportieren zu können, die durch den Manipulator bzw. Greifer erreichbar sind. Außerdem sollte eine manuelle Bestückung durch Werkskräfte und eine automatisierte Bestückung durch den mobilen Roboter gewährleistet sein. Zur Fixierung der Werkzeuge wurde ein Standard-Werkzeugträger ausgewählt, der über eine drehbare Konstruktion auf der Montagefläche des Scout®active befestigt wird (Abbildung 5-9). Das Gelenk wird benötigt, da zur Aufnahme und Ablage von Werkzeugen im Werkzeugträger dieser um 30° angestellt werden muss, um Singularitätsprobleme des Manipulators zu umgehen. Durch den Werkzeugträger steigt die Transportkapazität des Scout®active auf fünf Werkzeuge. Außerdem wurde durch die Erweiterung der Transportkapazität bzw. die Anbringung des Werkzeugträgers die Grundlage für die Durchführung fahrtbegleitender Tätigkeiten geschaffen.

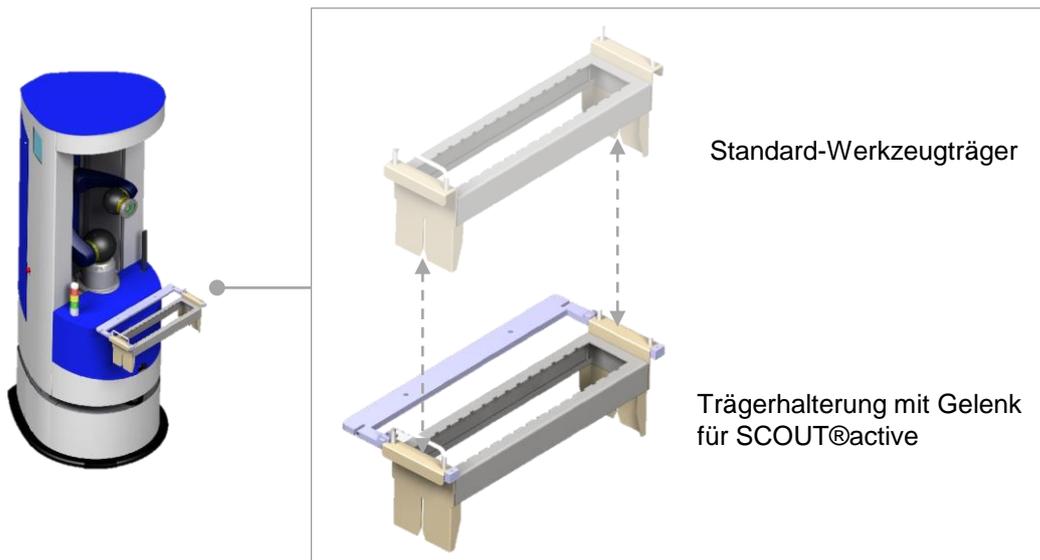


Abbildung 5-9: Erweiterung der Transportkapazität durch modularen Werkzeugträger

6 Integration zu Demonstrator und Evaluierung des erarbeiteten Konzepts

Verfasser: Florian Ried, Christian Härdtlein

6.1 Demonstratorische Umsetzung

Um die Funktionalität des entwickelten Konzepts einer automatisierten Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik praktisch zu veranschaulichen, wurde am Fraunhofer IGCV ein Demonstrator des Gesamtsystems aufgebaut. Dieser setzt sich aus den in Tabelle 6-1 aufgelisteten Teilsystemen des mobilen Roboters Scout@active, der Greiferstation, eines Werkzeuglagers sowie des Leitsystems zusammen.

Tabelle 6-1: Teilsysteme und Elemente des Demonstrators

Teilsystem	Elemente
Mobiler Roboter	Lokomotionseinheit, Manipulator, Transportkapazitätserweiterung, Software Roboter, Ladestation
Greiferstation	Halterung für Greiferbacken, Greiferbacken, Referenzierungshilfe
Werkzeuglager	Lagerregal, Referenzierungshilfe, Werkzeuge
Leitsystem	Rechner, WLAN-Router, Softwareanwendungen der Logikschicht, Datenbanksystem, Benutzeroberfläche

6.1.1 Systemintegration

Nachdem das Testen der Teilsysteme in Isolation erfolgreich abgeschlossen wurde, konnte mit ihrer Integration zum Gesamtsystem des Demonstrators begonnen werden. Ausgangspunkt war dabei der Aufbau der Hardware. Die Ladestation und das Werkzeuglager wurden in dem vorgesehenen Bereich des Technikums des IGCV positioniert, wo auch die Greiferstation auf einer Werkbank aufgebaut wurde. Vor dem Werkzeuglager und der Greiferstation wurde jeweils eine Referenzierungshilfe für den mobilen Roboter platziert. Diese besteht im Wesentlichen aus einem Matrixcode zur Identifizierung der Station sowie einem Prisma mit trapezförmiger Grundfläche aus Kunststoff, anhand dessen sich der Roboter mithilfe seiner Lasersensoren orthogonal und zentral vor der Station ausrichten kann. Der mobile Roboter wurde an seine Ladestation gefahren, die Transportkapazitätserweiterung montiert, teilweise mit Werkzeugen

bestückt und die Greifer des Manipulators mit einem Satz Greiferbacken ausgestattet. Die übrigen Greiferbacken wurden in der Greiferstation an den Positionen mit dem zugehörigen Matrixcode und weitere Werkzeuge im Werkzeuglager platziert. Als Hardware für das Leitsystem wurde ein Rechner, auf dem die Softwareanwendungen der Logikschicht sowie das Datenbanksystem und die Benutzeroberfläche ausgeführt werden, bereitgestellt. Mit diesem ist ein WLAN-Router verbunden, der ein privates Netzwerk gemäß den in Abschnitt 4.6 genannten Spezifikationen des Kommunikationssystems aufbaut.

Nach dem Aufbau der Hardware und der Installation des Leitsystems wurden die Interaktionen des mobilen Roboters mit den physischen Schnittstellen definiert. Dazu wurde zum einen die korrekte und reproduzierbare Referenzierung des Roboters an den Referenzierungshilfen der Greiferstation und des Werkzeuglagers überprüft. Zum anderen wurden ausgehend von der Referenzierungsposition per Teach-in Verfahren Bahnkurven des Manipulators aufgezeichnet und gespeichert, die für jede Lagerposition eine kollisionsfreie Aufnahme beziehungsweise Abgabe von Werkzeugen oder Greiferbacken ermöglicht. Außerdem wurden in der nativen Navigationssoftware des Scout@active die Positionen der Stationen hinterlegt, um eine autonome Wegfindung zu diesen zu ermöglichen. Abschließend wurden die Daten des Gesamtsystems in die Datenbank des Leitsystems eingetragen. Darunter fallen neben den stationären Daten wie der Position von Stationen, den verfügbaren Werkzeugen inklusive Werkzeug- und Aufnahmetyp sowie der Art und Position von Lagerplätzen auch dynamische Daten. Diese umfassen Positionen von Werkzeugen und Roboter aber auch Fertigungs- oder Transportaufträge. Nach diesen Schritten ist das Gesamtsystem in der Lage, die Funktionalität des entwickelten Konzepts zur Automatisierung und Vernetzung der Werkzeuglogistik praktisch zu demonstrieren.

6.1.2 Ablauf des demonstratorischen Anwendungsfalls

Der Ablauf des zentralen Use Cases des Forschungsprojekts ist anhand des Datenflussdiagramms in Abbildung 6-1 dargestellt. In der Datenbank des Leitsystems wird ein Transportbedarf angelegt. Der mobile Roboter soll hierbei ein bestimmtes Werkzeug zum Lagerregal transportieren. Die Logikschicht des Leitsystems erkennt den offenen Transportbedarf und erstellt daraus einen Transportauftrag, den es in Routenschritte heruntergebrochen dem mobilen Roboter übermittelt. Die Daten eines Routenschritts umfassen Zielposition, Ausgangs- und Ziellagerplatz, Aktionstyp, benötigte Greiferbacken sowie das zu greifende Werkzeug (siehe Tabelle 4-2). Im Rahmen des demonstratorischen Anwendungsfalls unterscheiden sich die aktuell gerüsteten und die benötigten Greiferbacken. Dementsprechend beinhaltet der erste Routenschritt die Fahrt zur Greiferstation, um dort einen Backenwechsel durchzuführen. Im Anschluss

an den Wechsel, der analog zum in Abbildung 5-8 visualisierten Prozess abläuft, führt der Roboter den eigentlichen Transportprozess aus. Das zum Lager zu transportierende Werkzeug befindet sich dabei im betrachteten Use Case bereits im Bauchladen des mobilen Roboters. Deshalb muss der Roboter zur Erfüllung des Transportauftrags das Werkzeuglager anfahren und das Werkzeug dort in die vom Leitsystem vorgegebene Lagerposition setzen. Nach dem erfolgreichen Transport- und Setzvorgang ist eine Rückmeldung des mobilen Roboters an das Leitsystem erforderlich. Daraufhin prüft das Leitsystem, ob eine Aktualisierung der Datensätze erforderlich ist. Abschließend erfolgt im Bedarfsfall eine Aktualisierung des Datenbanksystems. Der beschriebene Use Case ist nach Abbildung 3-2 der Automatisierungsstufe II der Werkzeuglogistik zuzuordnen. Durch eine Anpassung der dynamischen Daten in der Datenbank können innerhalb der Systemgrenzen des Demonstrators Transportprozesse verschiedener Werkzeuge sowie Start- und Zielpositionen auch sequenziell durchgeführt werden. Zur Eingabe der erforderlichen Informationen kann die Benutzeroberfläche des Leitsystems genutzt werden.

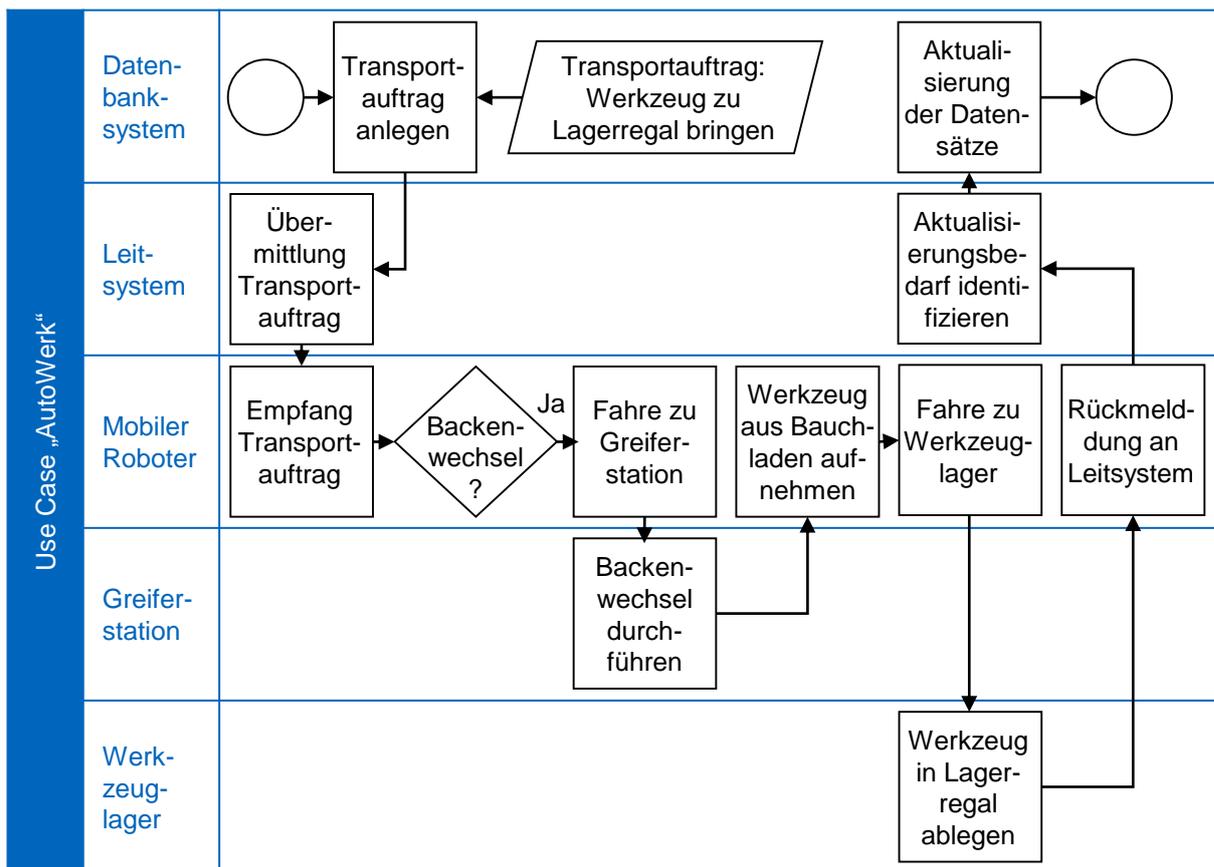


Abbildung 6-1: Use Case der demonstratorischen Umsetzung

6.2 Evaluation und Erfolgskontrolle

Im Anschluss an die Beschreibung der demonstratorischen Umsetzung der im Zuge des Forschungsvorhabens AutoWerk entwickelten Lösung zur Automatisierung und Vernetzung der Werkzeuglogistik wurde abschließend eine Evaluation der erzielten Ergebnisse und eine Erfolgskontrolle durchgeführt. Die Erfolgskontrolle orientiert sich dabei an den Teilergebnissen, die in Tabelle 1-1 und Tabelle 1-2 zu Beginn des Berichts vorgestellt wurden.

TE1: Autonome und wegoptimierte Navigation des mobilen Assistenzroboters in verschiedenen Produktionssystemen zum Transport von Werkzeugen

Der für das Forschungsprojekt verwendete mobile Roboter ist in der Lage, gesetzte Wegpunkte bzw. Stationen selbstständig anzufahren. Für die Umsetzung des Use Cases wurde ein industrienahes Umfeld mit entsprechenden Übergabestationen geschaffen. Diese wurden mit Stationen zur Referenzierung des mobilen Roboters ausgestattet. Die Kombination des entwickelten Leitsystems mit dem mobilen Roboter bzw. die erfolgreiche Validierung des Use Cases zeigt, dass eine wegoptimierte Navigation auch in verschiedenen Produktionssystemen zum Transport von Werkzeugen möglich ist. Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

TE2: Automatische Konfiguration des Roboters entsprechend des jeweiligen Transportauftrags

Das entwickelte und umgesetzte Konzept eines automatisierten Greiferwechsels ermöglicht die automatische Konfiguration des mobilen Roboters in Abhängigkeit des jeweiligen Transportauftrags. Der selbständige Greiferwechsel wurde im Rahmen des Demonstrators bzw. anhand des Use Cases erfolgreich validiert. Außerdem wird in diesem Kontext eine Patentanmeldung geprüft. Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

TE3: Automatische Identifikation von Werkzeugen durch den Roboter als Basis für die selbstständige Werkzeugsuche

Über eine USB-Kamera konnten einzelnen Konturen von Werkzeuglagern und verschiedener Werkzeugaufnahmen durch den mobilen Roboter erkannt werden. Um die Sensordaten jedoch sinnvoll als Kollisionsobjekt für die Bahnplanung nutzen zu können, müssen diese mit dem Koordinatensystem des mobilen Roboters synchronisiert werden. Durch die vorhandene und zu verwendende Hardware konnte dies nicht umfassend realisiert werden. Die Grundlage für die automatische Identifikation von Werkzeugen durch den Roboter zur selbständigen Werkzeugsuche wurde geschaffen und bereits in ROS implementiert (siehe Abschnitt 5.2) und kann bei einer Umsetzung der

automatisierten Werkzeuglogistik mit andern Modellen mobiler Roboter genutzt werden. Das Teilergebnis wurde somit teilweise erreicht

TE4: Durchführung von Montagetätigkeiten durch den Roboter auch während der Fahrt

Zur Erweiterung der Transportkapazität des mobilen Roboters wurde ein Bauchladen konstruiert und implementiert. Dadurch konnte die Transportkapazität von einem auf fünf Werkzeuge erhöht werden. Die Bewegung des Manipulators während der Fahrt ist bereits möglich, wirft aber derzeit noch rechtliche und sicherheitstechnische Fragestellungen auf. Bis diese geklärt sind, ist ein industrieller Einsatz fahrtparalleler Handhabungsprozesse in einem kollaborativen Umfeld von Mensch und Roboter nicht möglich. Auf Basis von Experteninterviews mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurden erste Voraussetzungen für fahrtbegleitende Tätigkeiten des Roboters geschaffen und erfolgreich evaluiert, im Demonstrator jedoch nicht umgesetzt. Das Teilergebnis wurde somit punktuell erreicht.

TE5: Automatische Aufnahme und Abgabe von Werkzeugen in verschiedenen Bereichen

Der entwickelte automatische Greiferwechsel stellt die Basis für die automatische Aufnahme und Abgabe von Werkzeugen dar. Im Rahmen des Forschungsprojekts wurde dies anhand von drei Szenarien erfolgreich evaluiert. Neben der Entnahme und Bestückung von Lagerregalen und -gestellen sowie Werkbänken ist der mobile Roboter durch das Greifersystem in der Lage, Werkzeuge aus seinem eigenen Bauchladen aufzunehmen bzw. diesem Werkzeuge zuzuführen. Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

TE6: Berücksichtigung der Kooperation mit Mitarbeitern durch eine Mensch-Maschine Schnittstelle

Die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine wurde durch die Benutzeroberfläche des Leitsystems umgesetzt. Diese bietet die Möglichkeit sowohl den aktuellen Zustand des Systems als auch geplante Aktionen der mobilen Roboter abzurufen. Darüber hinaus ist der Benutzer in der Lage, über das GUI im Notfall eigene Werkzeugbedarfe auszulösen. Der Benutzer kann so direkt mit der automatisierten Werkzeuglogistik interagieren. Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

TE7: Planungs- und Steuerungssystem für die Koordination und Überwachung der Aufträge für die mobilen Assistenzroboter

Die Planung und Steuerung der Transportaufträge der mobilen Assistenzroboter wurde anhand eines zentralen Leitsystems umgesetzt. Es identifiziert Transportbedarfe aus eingeplanten Fertigungsaufträgen, kombiniert diese zu Transportaufträgen und übermittelt sie an die mobilen Roboter. Anhand der Rückmeldungen des Roboters aktualisiert es anschließend den Datenbestand der internen Datenbank. Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

TE8: Schnittstellen für die Systemintegration in die bestehende IT-Landschaft

In der Implementierung des Leitsystems sind die Voraussetzungen für Schnittstellen in bestehende IT-Landschaft integriert. Die konkrete Umsetzung dieser Schnittstellen wurde im Projektverlauf, wie bereits in Abschnitt 4.5.2 diskutiert, in Ermangelung eines Zugriffs auf geeignete IT-Systeme nicht durchgeführt. Bei der Programmierung dieser Schnittstellen handelt es sich jedoch um einen gängigen Prozess in der industriellen Praxis, der deswegen kein Risiko für eine industrielle Implementierung des Gesamtkonzepts darstellt. Das Teilergebnis wurde somit teilweise erreicht.

TE9: Demonstrator zur Evaluierung des entwickelten Gesamtsystems

Das entwickelte Konzept zur Automatisierung und Vernetzung der Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik wurde in Form eines Demonstrators im Technikum des Fraunhofer IGCV umgesetzt und evaluiert. Der Demonstrator umfasst einen mobilen Roboter, ein Lagersystem, eine Station zum Greiferwechsel sowie das Leitsystem. Der Roboter kann in diesem Umfeld automatisiert Werkzeuge transportieren und handhaben. Für das Leitsystem wurde zusätzlich eine Evaluierung anhand eines Simulationsmodells vorgenommen, wobei die Funktionsfähigkeit auch für große Produktionssysteme bestätigt werden konnte. Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

TE10: Methode zur Potenzialermittlung zum wirtschaftlichen Einsatz eines mobilen Assistenzroboters in der industriellen Produktion

Mit der a priori Wirtschaftlichkeitsberechnung wurde eine Methode entwickelt, die es Unternehmen erlaubt, bereits in einem sehr frühen Planungsstadium das Potential einer Automatisierung der Werkzeuglogistik zu ermitteln. Als zentrales Entscheidungskriterium wird dabei der Kapitalwert herangezogen. Durch die Visualisierung der Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsabschätzung in der browserbasierten Applikation wird zusätzlich gezeigt, welche Auswirkungen veränderte Systemparameter auf den zu erwartenden Kapitalwert haben. Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

TE11: Entlastung und Unterstützung der Maschinenbediener

Die mobilen Roboter unterstützen die Werkkraft durch die Übernahme der Transport- und Handhabungsprozesse im Rahmen der Werkzeugbereitstellung. Dadurch entlasten sie die Werkkraft zum einen körperlich von Wegstrecken sowie dem Suchen nach und Tragen von Werkzeugen und zum anderen geistig, indem sie die Werkkraft von der Verantwortung entbinden, rechtzeitig für die Werkzeugbereitstellung Sorge zu tragen, sodass diese ihre volle Aufmerksamkeit auf den wertschöpfenden Fertigungsprozess richten kann. Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

TE12: Aussagen zur Akzeptanz von mobiler Assistenzrobotik in der Produktion

Die Akzeptanz mobiler Roboter in der Produktion wurde im Forschungsprojekt anhand von Expertengesprächen untersucht. Dabei wurden einerseits die Mitglieder des projektbegleitenden Ausschusses und andererseits Vertreter von Herstellern sowie Anwendern von FTF befragt. Der allgemeine Konsens bestand darin, dass die Akzeptanz für mobile Robotik in der Produktion stark von der Kommunikation mit und Einbindung der Werkkräfte während des Planungs- und Implementierungsprozessen abhängt. Diese Erkenntnisse wurden sowohl in die Anforderungsanalyse als auch in die Konzeptionierung und Implementierung der Benutzeroberfläche einbezogen (siehe Abschnitt 4.4.6). Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

TE13: Erhöhung der Prozesssicherheit und -effizienz

Durch das entwickelte Konzept wird die Effizienz der Werkzeuglogistik erhöht, indem es wenig anspruchsvolle Transport- und Handhabungsprozesse übernimmt und Werkkräften dadurch erlaubt, sich auf komplexe manuelle Prozesse zu fokussieren. Durch die zentrale Planung von Transportaufträgen im Leitsystem werden darüber hinaus Optimierungspotenziale in der Routenplanung erschlossen. Diese können durch die Weiterentwicklung von Algorithmen zur Lösung des Pickup-and-Delivery Problems weiter ausgebaut werden. Auch die Prozesssicherheit wird durch die Automatisierung der Werkzeuglogistik erhöht. Anhand der selbständigen Aktualisierung des Datenbestandes im Leitsystem und werden Brüche im Informationsfluss und falsche Werkzeugbereitstellungen vermieden. Eine Schwachstelle stellt jedoch die noch nicht final implementierte kamerabasierte Identifikation von Werkzeugen dar. Dadurch fällt es dem System schwer, Abweichungen zwischen Realität und Datenbasis aufgrund undokumentierter manueller Eingriffe zu identifizieren und entsprechend zu reagieren. Das Teilergebnis wurde somit überwiegend erreicht.

TE14: Minimierung von Stillstandszeiten

Die Minimierung von Stillstandszeiten von Werkzeugmaschinen aufgrund verspätet gelieferter Werkzeuge war eine der zentralen Problemstellungen des Forschungsprojekts. Es wurde im Wesentlichen durch zwei Funktionalitäten des Leitsystems adressiert. Dabei handelt es sich zum einen um die prädiktive Transportbedarfsermittlung innerhalb eines dynamischen Zeithorizonts, die gleichzeitig eine Rechtzeitige Einplanung von Transportbedarfen und eine hohe Reaktionsfähigkeit auf kurzfristige Änderungen zulässt. Zum anderen ist in den Algorithmen zur Tourenplanung stets die späteste Lieferzeit als Randbedingung integriert, sodass in den Transportaufträgen die rechtzeitige Bereitstellung über die höchste Priorität verfügt. Das Teilergebnis wurde somit erreicht.

7 Zusammenfassung der Forschungsergebnisse und Ausblick

Verfasser: Florian Ried

7.1 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgangspunkt des Forschungsvorhabens AutoWerk sind die wachsenden Anforderungen des Marktes an das produzierende Gewerbe. Diese wirken sich in Form einer steigenden Anzahl an notwendigen Werkzeugwechseln auch auf die Werkzeuglogistik aus. Deren aktuell größtenteils manuell durchgeführten Prozesse stoßen in der Konsequenz an ihre Grenzen. Die Folge davon können Unterbrechungen des Produktionsprozesses aufgrund nicht termingerecht bereitgestellter Werkzeuge sein, die für betroffene Unternehmen zu erheblichen Verlusten führen.

Das Forschungsprojekt adressiert diese Herausforderung anhand einer erfolgsversprechenden Lösungsstrategie: Der Automatisierung der Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik mit dem Ziel, eine Steigerung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit der Werkzeuglogistik zu erreichen und gleichzeitig der Anteil an wertschöpfenden Prozessen für menschliche Arbeitskraft zu erhöhen. Dazu wurde im Projekt AutoWerk ein Konzept entwickelt, das die Transport- und Handhabungsprozesse der Werkzeugbereitstellung an autonome, mobile Plattformen überträgt, die mit einem Manipulator ausgestattet sind. Die Planung und Koordination der Roboter erfolgt dabei über ein zentrales Leitsystem.

Aufgrund der großen Diversität von Werkzeugen musste im Rahmen von AutoWerk eine Einschränkung hinsichtlich der betrachteten Werkzeugtypen stattfinden. Die Auswahl fiel mit spanenden Werkzeugen mit geometrisch bestimmten Schneiden auf die größte und am weitesten verbreitete Werkzeuggruppe im industriellen Einsatz. Der Fokus der Planung und Steuerung liegt auf der effizienten Bereitstellung von Werkzeugen und sieht Faktoren wie Produktionsplanung oder Lagerstrategien als fixe Eingangsdaten, die nicht Gegenstand eigener Optimierungen sind. Darauf aufbauend wurden Einsatzszenarien unterschiedlichen Automatisierungsgrads definiert und die zugehörigen Anforderungen an Planung und Durchführung der Werkzeuglogistik definiert, die die Grundlage für die weitere Konzeptentwicklung bilden.

Um aus informationstechnischer Sicht die richtigen Werkzeuge zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort bereitzustellen, muss die automatisierte Werkzeuglogistik über eine effiziente Planung- und Steuerungslogik verfügen. Dazu wurde eine hybride Lösung gewählt, bei der die Planung von einem zentralen Leitsystem vorgenommen wird, während die operative Steuerung in den Verantwortungsbereich der mobilen Roboter fällt. Die zentralen Aufgaben des Leitsystems sind das Einlesen eingeplanter Fertigungsaufträge aus ERP- oder PPS-Systemen, die Identifikation von Transportbedarfen, deren Kombination zu effizienten Transportaufträgen sowie die Übermittlung von Steuerungsbefehlen an die Roboter. In der entwickelten Software sind die einzelnen Aufgaben in gekapselten Modulen implementiert, die eine unkomplizierte Anpassung und Erweiterung für unternehmensspezifische Randbedingungen ermöglichen. Durch die Evaluation des Leitsystems an einem Simulationsmodell konnte gezeigt werden, dass auch für große Produktionssysteme mit mehreren mobilen Robotern eine zuverlässige Planung der Werkzeuglogistik umgesetzt wird.

Parallel zur Entwicklung des Leitsystems wurde der im Rahmen des Projekts zur Verfügung stehende mobile Roboter für den Einsatz in der Werkzeuglogistik adaptiert. Zu diesem Zweck wurde zum einen eine Ansteuerung des Manipulators in ROS inklusive simulativer Zielposenplanung umgesetzt. Zum anderen wurden ein Konzept zum automatisierten Wechsel von Greiferbacken entwickelt und gefertigt. Zur Erhöhung der Transportkapazität des Roboters wurde dieser um eine Vorrichtung zur Aufnahme von bis zu fünf Werkzeugen erweitert.

Anschließend wurden die entwickelten Teilsysteme zu einem Gesamtsystem integriert. Dieses ist in der Lage, einen demonstratorischen Anwendungsfall durchzuführen und konnte so zur Evaluation und letztendlich zur praktischen Bestätigung des Konzepts zur Automatisierung der Werkzeuglogistik genutzt werden.

Um die demonstratorisch umgesetzte Lösung erfolgreich in die industrielle Praxis zu überführen, sind einige Erweiterungen notwendig. Dabei ist an erster Stelle die Finalisierung der Implementierung einer Schnittstelle zwischen Leitsystem und externen IT-Systemen erforderlich, die im Projekt aufgrund der in Abschnitt 4.5.2 und 6.2 diskutierten Randbedingungen nicht realisiert werden konnte. Da sich die vorhandenen IT-Infrastrukturen zwischen Unternehmen üblicherweise stark voneinander unterscheiden, wird die Schnittstelle zu einem gewissen Teil immer an die individuellen Randbedingungen angepasst werden müssen. Hinsichtlich der Kommunikation mit den mobilen Robotern ist eine vollständige Umsetzung der VDA 5050 mittelfristig vorteilhaft, damit durch die standardisierte Kommunikationsschnittstelle auch heterogene Roboterflotten koordiniert werden können. Außerdem ist die finale Implementierung einer automatisierten kamerabasierten Werkzeu-erkennung wünschenswert, um Abweichungen

zwischen Realität und Datenbank zu erkennen und dadurch Fehler zu vermeiden. Diese konnte im Projekt aufgrund Beschränkungen des verfügbaren Robotersystems nur softwareseitig umgesetzt werden. Hardwareseitig ist für den industriellen Einsatz im Vergleich zur demonstratorischen Lösung die Auswahl einer besser geeigneten mobilen Plattform notwendig. Als Anhaltspunkt hierzu können die Empfehlungen des morphologischen Kastens dienen, der im Rahmen des Projekts entwickelt wurde (siehe 7.3.3Anhang A). Der höchste Änderungsbedarf besteht dabei in einer weiteren Erhöhung der Transportkapazität des mobilen Roboters, um mehr Transportbedarfe innerhalb eines Transportauftrags erfüllen zu können und damit die Effizienz des Gesamtsystems zu steigern. Bei einer ausreichenden Transportfläche ist es außerdem denkbar, die Greiferstation direkt auf dem mobilen Roboter zu montieren, um Wegzeiten von und zu stationären Greiferstationen einzusparen.

Über diese kurzfristig und anhand marktverfügbarer Lösungen umsetzbaren Erweiterungen hinaus, existiert weiterer Forschungsbedarf, um zusätzliche Potentiale des entwickelten Konzepts der automatisierten Werkzeuglogistik zu erschließen. Dies ist zum einen die direkte Interaktion mit intelligenten Werkzeugmaschinen zur Bestückung der internen Werkzeugspeicher. Dabei muss sowohl hardwareseitig eine physische Schnittstelle zwischen mobilem Roboter und Werkzeugmaschine entwickelt als auch softwareseitig die Gestaltung einer bidirektionalen Kommunikation untersucht werden. Zum anderen kann durch eine detaillierte Analyse des Pickup-and-Delivery Problems im innerbetrieblichen Kontext eine weitere Effizienzsteigerung der Werkzeuglogistik realisiert werden. Zu diesem Zweck kann ausgehend von bestehenden Algorithmen zur Lösung des PDP aus dem Bereich der Transportlogistik eine Adaption an die Rahmenbedingungen und Anforderungen der Intralogistik durchgeführt werden, die in einer Steuerungsstrategie für mobile Roboter in Produktionssystemen verschiedener Größe mündet. Ein drittes Optimierungspotenzial ist die fahrtparallele Durchführung von Handhabungsprozessen des mobilen Roboters, wodurch auch die Transportzeiten wertschöpfend genutzt werden können. Mögliche Handhabungsprozesse sind beispielsweise das Wechseln von Greiferbacken, Qualitätssicherungsaufgaben oder die Montage oder Demontage von Systemwerkzeugen. Neben der technischen Umsetzung muss dabei ein besonderer Fokus auf die notwendige Anpassung rechtlicher und normativer Restriktionen der Sicherheitsbestimmungen gelegt werden, um eine industrielle Nutzbarkeit gewährleisten zu können.

7.2 Verwendung der zugewendeten Mittel

Wissenschaftlich-technisches Personal und studentische Hilfskräfte (Einzelansatz A.1 und A.3 des Finanzierungsplans):

Um die Inhalte zur Entwicklung eines Konzepts zur Automatisierung der Werkzeuglogistik im Forschungsvorhaben bearbeiten zu können, bedurfte es in allen Bereichen der sechs Arbeitspakete Mitarbeitern mit qualifizierter akademischer Ausbildung. Infolgedessen war es notwendig Mitarbeiter der Einstufung TV-L 13 mit der Bearbeitung des Forschungsvorhabens im Umfang von 23,5 Personenmonaten seitens des fml und 22,52 Personenmonaten seitens des IGCV zu beauftragen. Zur Unterstützung für sich wiederholende Tätigkeiten und Routinearbeiten auf Weisung wurden während der gesamten Projektlaufzeit studentische Hilfskräfte im Umfang von 22,9 Personenmonaten seitens des fml und 8,17 Personenmonaten seitens des IGCV eingesetzt.

Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans):

Es wurden keine Finanzmittel für Gerätebeschaffungen beantragt.

Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

Es wurden keine Finanzmittel für Leistungen Dritter beantragt.

7.3 Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Der Ergebnistransfer in die Wirtschaft wurde mit Hilfe der geplanten Transfermaßnahmen sichergestellt. Diese gliedern sich in solche während der Projektlaufzeit und solche nach der Projektlaufzeit.

7.3.1 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Tabelle 7-1 listet die Transfermaßnahmen auf, die während der Projektlaufzeit stattfanden.

Tabelle 7-1: Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Maßnahme	Rahmen	Realisierung
A Projektbegleitender Ausschuss	A1 Vorstellung des Projekts, Erfassung spezifischer Anforderungen der KMU, Schärfung des gemeinsamen Zielbilds	Durchgeführt am 28.03.2019
	A2 Vorstellung und Diskussion von alternativen Konzepten und Technologien	Durchgeführt am 03.03.2020
	A3 Vorstellung und Diskussion der Ergebnisse	Durchgeführt am 22.10.2020
B Vorträge auf Fachtagungen von Industrie und Wissenschaft	B1 Vortrag auf der Tagung „Mobile Robotik“ der IHK Augsburg	Durchgeführt am 04.06.2019
	B2 Vortrag auf dem Deutschen Logistik-Kongress in Berlin	Durchgeführt am 25.10.2019
C Internetdarstellung	C1 Projektvorstellung auf der Homepage des Lehrstuhls fml	Online seit 11/2018
	C2 Projektvorstellung auf der Homepage des Fraunhofer IGCV	Online seit 01/2019
	C3 Projektvorstellung über den Newsletter des Lehrstuhl fml	Veröffentlicht am 11.12.2019 und 08.10.2020
	C4 Präsentation der Projektergebnisse über den LinkedIn Account des Lehrstuhls fml	Veröffentlicht am 08.01.2021
D Veröffentlichungen	D1 Publikation in einschlägigen Fachzeitschriften	
	• wt Werkstattstechnik online	Erschienen 07/2019
	• fördern+heben	Erschienen 10/2019
	• ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb	Erschienen 10/2020
E Übernahme in die Lehre	E1 Mitarbeit studentischer Hilfskräfte	Seit 11/2018
	E2 Betreuung von Studienarbeiten (Semester-, Bachelor- und Masterarbeiten) im Rahmen des Projekts	Seit 01/2019

7.3.2 Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Tabelle 7-2 enthält die geplanten Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Tabelle 7-2: Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit

Maßnahme	Rahmen	Realisierung
F Beratung, Weiterbil- dung	F1 Beratung von Unternehmen zu konkreten Problemstellungen und Schulungsangebote über Veranstaltungen des Logistik-Innovations-Zentrums (liz) und des Mittelstand 4.0 Kompetenzzentrums Augsburg	Seit 12/2020
G Forschungsbericht	G1 Der Abschlussbericht wird digital und in gedruckter Form erhältlich sein	Geplant ab 06/2021
H Übernahme in die Lehre	H1 Ergebnisse des Forschungsprojekts werden im Rahmen von Vorlesungen und Praktika am Lehrstuhl fml und am Fraunhofer IGCV eingebunden	Geplant ab 04/2021
I Demonstratoren	I1 Die Demonstratoren verbleiben nach Projektende an den Forschungsstellen und können zur Information interessierter Unternehmen genutzt werden	Seit 12/2020

7.3.3 Zusammenfassung der wichtigsten bereits erfolgten Maßnahmen

Veröffentlichungen

- Härdtlein, C.; Ried, F.; Ziegler, S.; Miller, A.; Berg, J.; Braunreuther, S.; Fottner, J.; Reinhart, G.: Automatisierung der Werkzeuglogistik – Herausforderungen beim Einsatz mobiler industrieller Servicerobotik. In: wt Werkstattstechnik online, Jg. 109 (2019) Nr. 7/8, S. 558–562. [Här-2019a]
- Härdtlein, C.; Berg, J.: Mobile Roboter zur Automatisierung der Werkzeuglogistik. In: fördern+heben (2019) Nr. 10, S. 52–54. [Här-2019b]
- Ried, F.; Härdtlein, C.; Ziegler, S.; Miller, A.; Fottner, J.: Intelligente Steuerung einer automatisierten Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 115 (2020) Nr. 10, S. 707–710. [Rie-2020]

Vorträge

- Härdtlein, C.: Scientist Pitch zur Automatisierung der Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik – FORobotics Tagung - Mobile Robotik 2019. Vortrag. IHK Schwaben, Augsburg, 04.07.2019. [Här-2019c]
- Ried, F.: Automatisierung und Vernetzung der Werkzeuglogistik – Deutscher Logistik-Kongress. Vortrag. Bundesvereinigung Logistik e.V., Berlin, 25.10.2019. [Rie-2019]

Studienarbeiten

- Konzeption eines Kommunikationssystems für mobile Roboter in Produktionsumgebungen [Mil-2019]
- Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes mobiler Assistenzroboter in der Werkzeugbereitstellung [Ras-2019]
- Entwicklung einer Methodik zur automatischen Modellgenerierung in Plant Simulation [Pöl-2019]
- Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts für den automatisierten Greiferwechsel im Bereich der mobilen Robotik [Sch-2019]
- Automatisierte Bestückung von Werkzeugmaschinen mittels eines mobilen Leichtbauroboters [Öst-2019]
- Development of a Human-Machine Interface for the management of tool transport orders via mobile robots [Mil-2020a]
- Methode zur Konzeption und teilautomatisierten Implementierung einer kognitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle am Beispiel der Werkzeuglogistik [Mil-2020b]
- Entwicklung eines Datenbanksystems als Basis der Steuerung einer automatisierten Werkzeuglogistik [Bau-2020]
- Entwicklung einer Softwarearchitektur zur Befähigung autonomer Serviceroboter für die Werkzeugbereitstellung [San-2020]

Literaturverzeichnis

- [Abe-2007] Abele, E.; Liebeck, T.; Hueske, B.: Optimierung des Werkzeugmanagements – Verbesserung der internen Prozesse und Integration von Dienstleistung in der spanenden Fertigung. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 102 (2007) Nr. 12, S. 844–848.
- [Abe-2009] Abele, E.; Hueske, B.: Gestaltung der Werkzeuglogistik im Zerspanungsbetrieb. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 104 (2009) Nr. 6, S. 503–506.
- [Abe-2011] Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion – Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l., 2011.
- [Abt-2017] Abts, D.; Müller, W.: Grundkurs Wirtschaftsinformatik – Eine kompakte und praxisorientierte Einführung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2017.
- [Bat-2014] Battarra, M.; Cordeua, J.-F.; Iori, M.: Pickup-and-Delivery Problems for Goods Transportation. In: Toth, P. (Hrsg.): The vehicle routing problem. (SIAM), Philadelphia, Pa., 2014, S. 161–191.
- [Bau-2020] Baumgartner, M.: Entwicklung eines Datenbanksystems als Basis der Steuerung einer automatisierten Werkzeuglogistik. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2020.
- [Bos-2017] Bosch, E.; Grosch, T.; Abele, E.; Metternich, J.; Landfried, K.-C.; Großkurth, D.; Hofmann, K.; Wiescholke, M.; Ebben, A.; Schloen, J.; Ziegltrum, F.; Gutmacher, M.; Schwennig, B.: Intelligente Werkzeuge für die vernetzte Produktion von morgen – SmartTool Abschlussbericht. Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen; Technische Universität Darmstadt, 2017.
- [Bos-2018] Bosch, E.; Metternich, J.: Understanding and assessing complexity in cutting tool management. In: Procedia CIRP (2018) Nr. 72, S. 1499–1504.

- [Bre-2017] Brecher, C.; Weck, M.: Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [Brö-2016] Bröhl, C.; Nelles, J.; Brandl, C.; Mertens, A.; Schlick, C. M.: TAM Reloaded: A Technology Acceptance Model for Human-Robot Cooperation in Production Systems. In: Stephanidis, C. (Hrsg.): HCI International 2016 – Posters' Extended Abstracts. Springer International Publishing, Cham, 2016, S. 97–103.
- [Bul-2019] Bulatovych, D.: Choosing a Tech Stack for the Full-Cycle Web Application Developmen. <https://yalantis.com/blog/tech-stack-for-web-app-development/>, Aufruf am 17.03.2020.
- [Co-1991] Co, C. G.; Tanchoco, J. M. A.: A review of research on AGVS vehicle management. In: Engineering Costs and Production Economics, Jg. 21 (1991), S. 35–42.
- [Das-2018] Dasgupta, R.: Voice User Interface Design – Moving from GUI to Mixed Modal Interaction. Apress, Berkeley, CA, 2018.
- [DeM-1979] DeMarco, T.: Structured analysis and system specification. Yourdon Press, Englewood Cliffs, NJ, 1979.
- [DIN-69651] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Klassifizierung der Werkzeugmaschinen für Metallbearbeitung. DIN Nr. 69651, 1974.
- [DIN-8580] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. DIN Nr. 8580, 2020.
- [Fis-2015] Fischer, M.; Hänel, M.; Klassen, G.; Kolmsee, B.; Krause, S.; Kurz, M.; Polster, S.; Rühl, A.; Vom Stein, R.; Steinhauser, M.; Termer, F.: Entwicklung erfolgreicher Webanwendungen – Leitfaden Webentwicklung 2015. <https://www.bitkom.org/sites/default/files/pdf/noin-index/Publikationen/2015/Leitfaden/Entwicklung-erfolgreicher-Webanwendungen/LF-Webanwendungen-150910-1.pdf>, Aufruf am 17.03.2020.
- [Foe-2001] Foegen, M.; Battenfeld, J.: Die Rolle der Architektur in der Anwendungsentwicklung. In: Informatik-Spektrum, Jg. 24 (2001) Nr. 5, S. 290–301.

- [Fow-2015] Fowler, M.: Patterns of enterprise application architecture. Addison-Wesley, Boston, Mass., Munich, 2015.
- [Fra-2020] Fraunhofer IGCV: FORobotics: mobile, ad-hoc cooperating roboter teams – Publikationsübersicht. http://www.forobotics.de/?page_id=334, Aufruf am 12.03.2021.
- [Gau-2018] Gausemeier, J.; Dumitrescu, R.; Echterfeld, J.; Pfänder, T.; Steffen, D.; Thielemann, F.: Innovationen für die Märkte von morgen – Strategische Planung von Produkten, Dienstleistungen und Geschäftsmodellen. Hanser, München, 2018.
- [Gef-2004] GEFEN, D.: What Makes an ERP Implementation Relationship Worthwhile: Linking Trust Mechanisms and ERP Usefulness. In: Journal of Management Information Systems, Jg. 21 (2004) Nr. 1, S. 263–288.
- [Gei-1997] Geib, T.: Geschäftsprozeßorientiertes Werkzeugmanagement. Gabler Verlag, Wiesbaden, s.l., 1997.
- [Gon-2017] González, S. R.; Mondragón, I.; Zambrano, G.; Hernandez, W.; Montana, H.: Manufacturing Control Architecture for FMS with AGV: A State-of-the-Art. In: Chang, I., et al. (Hrsg.): ADVANCES IN AUTOMATION AND ROBOTICS RESEARCH IN LATIN AMERICA. Springer, Panama City, 2017, S. 157–172.
- [Gro-2019] Grosch, T.; Schloen, J.; Weigold, M.; Abele, E.: SmartTool++. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 114 (2019) Nr. 4, S. 219–222.
- [Gün-2013] Günthner, W. A.: Schlanke Logistikprozesse – Handbuch für den Planer. Springer Vieweg, Berlin, 2013.
- [Här-2019a] Härdtlein, C.; Ried, F.; Ziegler, S.; Miller, A.; Berg, J.; Braunreuther, S.; Fottner, J.; Reinhart, G.: Automatisierung der Werkzeuglogistik – Herausforderungen beim Einsatz mobiler industrieller Servicerobotik. In: wt Werkstattstechnik online, Jg. 109 (2019) Nr. 7/8, S. 558–562.
- [Här-2019b] Härdtlein, C.; Berg, J.: Mobile Roboter zur Automatisierung der Werkzeuglogistik. In: fördern+heben (2019) Nr. 10, S. 52–54.

- [Här-2019c] Härdtlein, C.: Scientist Pitch zur Automatisierung der Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik – FORobotics Tagung - Mobile Robotik 2019. Vortrag. IHK Schwaben, Augsburg, 04.07.2019.
- [Hau-2013] Haun, M.: Handbuch Robotik – Programmieren und Einsatz intelligenter Roboter. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Hee-2015] Heeschen, D.; Klocke, F.; Arntz, K.: Life Cycle Oriented Milling Tool Management in Small Scale Production. In: Procedia CIRP, Jg. 29 (2015), S. 293–298.
- [IFR-2019] IFR - International Federation of Robotics: Serviceroboter: Weltweiter Verkaufswert erreicht 12,9 Milliarden USD – FR stellt neuen Bericht „World Robotics 2019“ vor, 2019.
- [Ion-2020] Ionos SE: CRUD: die Basis der Datenverwaltung. <https://www.ionos.de/digitalguide/websites/web-entwicklung/crud-die-wichtigsten-datenbankoperationen/>, Aufruf am 03.03.2021.
- [Irn-2014] Irnich, S.; Toth, P.; Vigo, D.: The Family of Vehicle Routing Problems. In: Toth, P. (Hrsg.): The vehicle routing problem. (SIAM), Philadelphia, Pa., 2014, S. 1–33.
- [Jae-2016] Jaeckle, L.; Goll, J.; Dausmann, M.: Das Architekturmuster Model-View-ViewModel. Fakultät Informationstechnik, Hochschule Esslingen, Esslingen, 2016.
- [Jen-2007] Jendoubi, L.: Management mobiler Betriebsmittel unter Einsatz ubiquitärer Computersysteme in der Produktion. Univ; Jost-Jetter-Verl., Stuttgart, Heimsheim, 2007.
- [Kad-2005] Kaderali, F.: Kommunikationstechnik I – Kurseinheit 1 Kommunikationsmodelle, Fernuniversität in Hagen, Hagen, 2005.
- [Kal-2018] Kaluža, M.; Vukelić, B.: Comparison of front-end frameworks for web applications development. In: Zbornik Veleučilišta u Rijeci, Jg. 6 (2018) Nr. 1, S. 261–282.

- [Kaz-2015] Kazala, R.; Taneva, A.; Petrov, M.; St. Penkov: Wireless Network for Mobile Robot Applications. In: IFAC-PapersOnLine (2015) Nr. 48-24, S. 231–236.
- [Kuh-2019] Kuhnert, N.: Workshop zu GS1 Standards für Identifikation und Track & Trace. Vortrag, Köln, 04.11.2019.
- [Lie-2017] Lieb, C.; Klenk, E. M.; Galka, S.; Keuntje, C.: Einsatz von Routenzugsystemen zur Produktionsversorgung – Studie zu Planung, Steuerung und Betrieb. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching b. München, 2017.
- [May-1988] Mayer, J.: Werkzeugorganisation für flexible Fertigungszellen und -systeme. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, s.l., 1988.
- [McM-1988] McMenamin, S. M.; Palmer, J. F.: Strukturierte Systemanalyse. Hanser, München, 1988.
- [Mil-2019] Miller, A.: Konzeption eines Kommunikationssystems für mobile Roboter in Produktionsumgebungen. Semesterarbeit. Fraunhofer IGCV, Augsburg, 2019.
- [Mil-2020a] Miller, A.: Development of a Human-Machine Interface for the management of tool transport orders via mobile robots. Semesterarbeit. Fraunhofer IGCV, Augsburg, 2020.
- [Mil-2020b] Miller, A.: Methode zur Konzeption und teilautomatisierten Implementierung einer kognitiven Mensch-Maschine-Schnittstelle am Beispiel der Werkzeuglogistik. Master's Thesis. Fraunhofer IGCV, Augsburg, 2020.
- [Mül-2019] Müller, P.: Vergleich von Angular und Vue.js für die Einführung in komponentenbasierte Frontend-Frameworks im Rahmen einer Vorlesung. Bachelorarbeit. Physikalische Technik/Informatik, Westsächsische Hochschule Zwickau, 2019.
- [Mum-1999] Mumm, A.: Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spanenden Fertigung. Vulkan-Verl., Essen, 1999.

- [Öst-2019] Öster, T.: Automatisierte Bestückung von Werkzeugmaschinen mittels eines mobilen Leichtbauroboters. Master's Thesis. Fraunhofer IGCV, Augsburg, 2019.
- [Pöl-2019] Pöllner, R.: Entwicklung einer Methodik zur automatischen Modellgenerierung in Plant Simulation. Master's Thesis. Lehrstuhl für Förder-technik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2019.
- [Ras-2019] Rassa, H.: Entwicklung einer Methodik zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes mobiler Assistenzroboter in der Werkzeugbereitstellung. Master's Thesis. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2019.
- [Rei-2017] Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 – Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. Hanser, München, 2017.
- [Rie-2019] Ried, F.: Automatisierung und Vernetzung der Werkzeuglogistik – Deutscher Logistik-Kongress. Vortrag. Bundesvereinigung Logistik e.V., Berlin, 25.10.2019.
- [Rie-2020] Ried, F.; Härdtlein, C.; Ziegler, S.; Miller, A.; Fottner, J.: Intelligente Steuerung einer automatisierten Werkzeuglogistik mittels mobiler Robotik. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 115 (2020) Nr. 10, S. 707–710.
- [Rös-2015] Röschinger, M.; Kipouridis, O.; Lechner, J.; Günthner, W. A.: AutoID-Konzept für ein cloud-basiertes Werkzeugmanagement – Digitalisierung und Automatisierung des Werkzeugmanagements für die Industrie 4.0. In: ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jg. 110 (2015) Nr. 1-2, S. 59–62.
- [Rös-2017] Röschinger, M.; Fottner, J.; Doll, U.; Bartram, T.; Götz, P.; Maier, M.; Schindecker Peter: Abschlussbericht zum Verbundprojekt ToolCloud – Unternehmensübergreifendes Lebenszyklusmanagement für Werkzeuge in der Cloud mittels eindeutiger Kennzeichnung und Identifikation. fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, 2017.

- [San-2020] Sansivieri, G.: Entwicklung einer Softwarearchitektur zur Befähigung autonomer Serviceroboter für die Werkzeugbereitstellung. Master's Thesis. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, München, 2020.
- [Sav-1995] Savelsbergh, M. W. P.; Sol, M.: The General Pickup and Delivery Problem. In: *Transportation Science*, Jg. 29 (1995) Nr. 1, S. 17.29.
- [Sch-2012] Schuh, G.; Stich, V.: *Produktionsplanung und -steuerung 1*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Sch-2016] Schaupp, E.; Abele, E.; Metternich, J.: Evaluating relevant factors for developing an optimal tool storage strategy. In: *Procedia CIRP* (2016) Nr. 55, S. 23–28.
- [Sch-2017a] Schuster, T.; Rüdert Von Collenberg, L.: *Investitionsrechnung: Kapitalwert, Zinsfuß, Annuität, Amortisation*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.
- [Sch-2017b] Schaupp, E.; Abele, E.; Metternich, J.: Potentials of digitalization in tool management. In: *Procedia CIRP* (2017) Nr. 63, S. 144–149.
- [Sch-2019] Schmid, M.: Entwicklung und Umsetzung eines Konzepts für den automatisierten Greiferwechsel im Bereich der mobilen Robotik. Bachelor's Thesis. Fraunhofer IGCV, Augsburg, 2019.
- [Sch-2020] Schmidt, T.; Reith, K.-B.; Klein, N.; Däumler, M.: Research on Decentralized Control Strategies for Automated Vehicle-based In-house Transport Systems – a Survey. In: *Logistics Research*, Jg. 13 (2020) Nr. 1
- [Sha-1998] Shannon, C. E.; Weaver, W.: *The mathematical theory of communication*. Univ. of Illinois Press, Urbana, 1998.
- [Sha-2018] Sharma, N.: React vs Angular vs Ember vs Vue – Which Is the Best JavaScript Framework? <https://www.apptunix.com/blog/react-vs-angular-vs-ember-vs-vue-best-javascript-framework/>, Aufruf am 16.03.2020.

- [Shu-2004] Shumilov, S.: Persistenz von Objekten. <http://www.odtms.org/wp-content/uploads/2013/11/016.01-Shumilov-Persistenz-von-Objekten-September-2004.pdf>, Aufruf am 03.03.2021.
- [Ste-1984] Steinhilber, H.: Planung und Realisierung von Werkzeugversorgungssystemen für die NC-Bearbeitung. Springer, Berlin, Heidelberg, 1984.
- [Ste-2017] Steiner, R.: Grundkurs Relationale Datenbanken – Einführung in die Praxis der Datenbankentwicklung für Ausbildung, Studium und IT-Beruf. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017.
- [Sun-2016] Sun, P.; Zhang, C.; Jiang, P.; Cao, W.: Cutting-tool delivery method in the context of industrial product service systems. In: Concurrent Engineering, Jg. 24 (2016) Nr. 2, S. 178–190.
- [Tsc-2016] Tschirner, C.: Rahmenwerk zur Integration des modellbasierten Systems Engineering in die Produktentstehung mechatronischer Systeme. Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn, 2016.
- [VDA-5050] VDA: Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung. VDA-Empfehlung Nr. 5050, 2020.
- [VDI-2206] VDI: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI - Einheitsblatt Nr. 2206, 2004.
- [VDMA-34193] VDMA: Serialisierung/Kennzeichnung von Werkzeugen und Werkzeugspannmitteln. VDMA-Einheitsblatt Nr. 34193, 2020.
- [Vog-2009] Vogel, O.; Arnold, I.; Chughtai, A.; Ihler, E.; Kehrer, T.; Mehlig, U.; Zdun, U.: Software-Architektur. Spektrum Akademischer Verlag, 2009.
- [Weh-2020] Wehking, K.-H.; Albrecht, W.; Becker, J.; Hager, H.-J.; Kille, C.; Popp, J.; Scherner, T.; Yousefifar, R.: Technisches Handbuch Logistik. Springer Vieweg, Berlin, [Heidelberg], 2020.

- [Wie-2004] Wiendahl, H.-P.; Gerst, D.; Keunecke, L.: Variantenbeherrschung in der Montage – Konzept und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Springer, Berlin, Heidelberg, 2004.
- [Zie-2002] Ziemer, S.: An Architecture for Web Applications. In: DIF 8914 Distributed Information Systems (2002)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Strukturierung der Werkzeuglogistik im Projekt AutoWerk	5
Abbildung 2-2: Grundfunktionen des Werkzeugkreislaufs nach [Mum-1999]	6
Abbildung 3-1: Einzelkomponenten und Abläufe in einem Werkzeugversorgungssystem (in Anlehnung an [Bre-2017])	15
Abbildung 3-2: Stufenmodell der Automatisierung in der Werkzeuglogistik [Här-2019b]	16
Abbildung 3-3: Zentrale Anforderungen an mobile Roboter in der Werkzeuglogistik	22
Abbildung 3-4: Referenzieren an Übergabestationen	23
Abbildung 3-5: Identifizieren von Werkzeugen	24
Abbildung 3-6: Kollisionsloses Greifen von Werkzeugen	24
Abbildung 3-7: Kollisionsloses Setzen von Werkzeugen	25
Abbildung 3-8: Kommunikationsschnittstellen	26
Abbildung 3-9: Hierarchie des Kennzahlensystems zur a priori Wirtschaftlichkeitsbewertung	29
Abbildung 3-10: Visualisierung des Kapitalwerts in der browserbasierten Applikation	30
Abbildung 4-1: Hybride Verteilung von Planung und Steuerung im Projekt AutoWerk	34
Abbildung 4-2: Umfeldmodell des Leitsystems	35
Abbildung 4-3: Prozesskette des Leitsystems als Flussdiagramm	37
Abbildung 4-4: Architektur der Datenverwaltung des Leitsystems nach [San-2020]	42
Abbildung 4-5: Datenmodell im Projekt AutoWerk als ER-Diagramm nach [Bau-2020]	44
Abbildung 4-6: Ablauf der Transportauftragsermittlung	46
Abbildung 4-7: Architektur des Flottenmanagements des Leitsystems nach [San-2020]	47
Abbildung 4-8: Ablauf des Orchestrierungsprozesses nach [San-2020]	48
Abbildung 4-9: Pseudocode der Prozesse des Moduls Datenbestandsüberwachung	49
Abbildung 4-10: Gesamtarchitektur des Leitsystems nach [Rie-2020]	56
Abbildung 4-11: Repräsentation einer Entität am Beispiel Werkzeug in der Datenbank (oben) und im Softwareframework (unten) nach [San-2020]	58

Abbildung 4-12: Softwarearchitektur des GUI	61
Abbildung 4-13: Hauptseite (Home) der entwickelten GUI	62
Abbildung 4-14: Oberfläche der Hauptfunktion Werkzeugbedarf anfordern	63
Abbildung 4-15: Validierung eines Eingabefeldes	63
Abbildung 4-16: Softwarearchitektur des VUI	64
Abbildung 4-17: Protokollstapel nach TCP/ IP-Referenzmodell	66
Abbildung 4-18: Simulationsmodell einer Testumgebung des Leitsystems [San-2020]	67
Abbildung 5-1: Mobiler Roboter Scout®active	70
Abbildung 5-2: Zielposenplanung (links) Schunk LWA 4P & PG 70 mit nachgebildeten Gehäuse des Scout®active und farblich markierter Kollisionsprüfung (rechts) in rviz	73
Abbildung 5-3: Punktwolke des Lagers (oben 2D-Front, unten 3D-Front, rechts 3D-seitlich)	74
Abbildung 5-4: Greifsystem (Schunk PG 70) und dessen Einzelkomponenten	77
Abbildung 5-5: Grundkonzept des Backenwechsels	77
Abbildung 5-6: Prozessablauf zur Herstellung von Wechselbacken	80
Abbildung 5-7: Modular erweiterbare Greiferstation	81
Abbildung 5-8: Ablage und Aufnahme der Backen in Greiferstation	81
Abbildung 5-9: Erweiterung der Transportkapazität durch modularen Werkzeugträger	82
Abbildung 6-1: Use Case der demonstratorischen Umsetzung	85

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1:	Wissenschaftlich-technische Teilergebnisse	3
Tabelle 1-2:	Wirtschaftliche Teilergebnisse	3
Tabelle 3-1:	Selektionskriterien für Unternehmen zur Prozessaufnahme	18
Tabelle 4-1:	Vom Leitsystem benötigte Informationen des Produktionssystems	38
Tabelle 4-2:	Daten eines Routenschrittes	40
Tabelle 5-1:	Patentrecherche für automatisierte Greiferwechselsysteme	76
Tabelle 5-2:	Konzepte zur Arretierung der Wechselbacken	78
Tabelle 5-3:	Konzepte zur Fixierung der Wechselbacken	79
Tabelle 6-1:	Teilsysteme und Elemente des Demonstrators	83
Tabelle 7-1:	Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit	95
Tabelle 7-2:	Geplante Transfermaßnahmen nach der Projektlaufzeit	96
Tabelle A-1:	Morphologischer Kasten für das mobile Robotersystem	A-1
Tabelle A-2:	Morphologischer Kasten für den Endeffektor	A-1
Tabelle A-3:	Morphologischer Kasten für das Lagersystem	A-1
Tabelle A-4:	Morphologischer Kasten für die Werkzeugmaschine	A-2
Tabelle A-5:	Morphologischer Kasten für die Werkzeugaufbereitung	A-2
Tabelle A-6:	Morphologischer Kasten für das Leitsystem	A-3
Tabelle A-7:	Morphologischer Kasten für die Umwelt einer automatisierten Werkzeuglogistik	A-3

Anhang A Morphologische Kästen

Tabelle A-1: Morphologischer Kasten für das mobile Robotersystem

Mobiler Roboter in der Werkzeuglogistik	Antrieb	Elektromotor	Verbrennungsmotor	Brennstoffzelle	Hydraulisch/ pneumatisch
	Fortbewegung	Räder	Ketten	Schienen	Beine
	Autonomie-grad	Liniengeführt	Teilautonom	Vollautonom	
	Manipulator	Kein	Knickarm	SCARA	Delta
	Traglast	< 5 kg	< 10 kg	< 25 kg	> 25 kg
	Lokalisierung	SLAM	Triangulation	Landmarke	
	Navigation	Odometrie	Kartenbasiert	Bildbasiert	Landmarken
	Referenzierung	Optisch	Teach-In	Mechanisch	
	Hinderniserkennung	Kamera	Laser	Lidar	Ultraschall
	Anzahl Lagerplätze	1	< 5	< 10	
	Identifikation Handhabungsobjekt	Magnetisch	Mechanisch	Optisch	Elektromagnetisch
	Kommunikation mit Mensch	Sprachsteuerung	Gestensteuerung	Web-applikation	Panel

Tabelle A-2: Morphologischer Kasten für den Endeffektor

Endeffektor	Greiferart	Einfachgreifer	Mehrfachgreifer		
	Greifpunkt	Innen	Außen		
	Schlussart	Kraftschluss	Formschluss		
	Greifbewegung	Zentrisch	Parallel		
	Greifprinzip	Mechanisch	Fluidisch	Magnetisch	
	Sensorik	Taktil	Kapazitiv	Induktiv	optisch

Tabelle A-3: Morphologischer Kasten für das Lagersystem

Lagersystem	Mobilität	Ja	Nein		
	Art	Gestell	Schubladen	Regal	Schrank
	Kapazität	< 10	< 50	< 100	> 100
	Belegungsart	fest	chaotisch		
	Lagerplatzidentifikation	optisch	elektromagnetisch		

Tabelle A-4: Morphologischer Kasten für die Werkzeugmaschine

Maschine	Art	Drehmaschine	Fräsmaschine	Bohrmaschine	Honmaschine
	Programmierung	Manuell	Maschinell	G-Code	Heidenhain
	Übergabestelle	Externer Lagerplatz	Inhärentes Magazin	Externes Magazin	
	Werkzeugkapazität	< 10	< 50	< 100	➤ 100
	Werkzeugaufnahme	HSK	SK	Morsekegel	Spannzange
	Werkzeugspanner	Hydraulisch	Pneumatisch	Mechanisch	
	Interaktion	Mechanisch	Informationstechnisch	Optisch	

Tabelle A-5: Morphologischer Kasten für die Werkzeugaufbereitung

Werkzeugaufbereitung	Vermessen	Manuell	Automatisch		
	Vermessen Standort	Zentral	Roboter	Dezentral (Maschine)	Extern
	Reinigen	Manuell	Automatisch		
	Reinigen Standort	Zentral	Roboter	Dezentral (Maschine)	Extern
	Montage Adapter	Manuell	Automatisch		
	Montage Adapter Standort	Zentral	Roboter	Dezentral (Maschine)	extern
	Montage Schneidkörper	Manuell	Automatisch		
	Montage Schneidkörper Standort	Zentral	Roboter	Dezentral (Maschine)	Extern
	Prüfen	Manuell	Automatisch		
	Prüfen Standort	Zentral	Roboter	Dezentral (Maschine)	Extern
	Nachschleifen	Manuell	Automatisch		
	Nachschleifen Standort	Zentral	Roboter	Dezentral (Maschine)	Extern

Tabelle A-6: Morphologischer Kasten für das Leitsystem

Leitsystem	Steuerung Roboter	Zentral	Dezentral		
	Auftragszuweisung	Zentral	Dezentral		
	Routen	Starr	Dynamisch		
	Informationsbeschaffung	Abfrage aus IT-Systemen nach Bedarf	Interne Datenbank	Zentrale Datenbank	
	Lokalisierung Roboter & WZM	Eigene Karte	Karten der Roboter		
	Kommunikation mit Roboter	Kabelgebunden		Kabellos	
		LAN	Ethernet	Funk	Infrarot
	Kommunikation mit IT-Systemen	Odate Webservices	SOAP Webservice	OPC UA	MQTT
Kommunikation mit Maschine	Keine	Über bestehendes IT-System	Über eigene Schnittstelle		

Tabelle A-7: Morphologischer Kasten für die Umwelt einer automatisierten Werkzeuglogistik

Umwelt	Hallentore/Schranken	Keine	Automatisch öffnend	Aktiv öffnen	
	Distanzen	< 100 m	< 500 m	< 1000 m	> 1000 m
	Untergrund	Eben	Uneben	Stufen	Steigung
	Einsatzgebiet	Indoor	Outdoor		
	Energieversorgung	Zentral	Dezentral	Verteilt	
	Verkehrsaufkommen	Kein	Gering	Mittel	Hoch