

Dana Díaz Torres

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Flexibilisierung und Verbesserung der Transporte auf dem Werksgelände durch den Einsatz autonom mobiler Roboter

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Flexibilisierung und Verbesserung der Transporte auf dem Werksgelände durch den Einsatz autonomer mobiler Roboter

Dana Díaz Torres

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der
Technischen Universität München zur Erlangung einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Prof. Dr. rer. nat. Tim C. Lüth

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner
2. Prof. Dr.-Ing. Harmut Zadek

Die Dissertation wurde am 27.06.2022 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 12.12.2022
angenommen.

Herausgegeben von:

Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

fml – Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik

Technische Universität München

Zugleich: Dissertation, München, Technische Universität München, 2023

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdruck, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – dem Autor vorbehalten.

Layout und Satz: Dana Díaz Torres

Copyright © Dana Díaz Torres, 2023

ISBN: 978-3-948514-27-3

Printed in Germany, 2023

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Professor Dr.-Ing. Johannes Fottner für seine kontinuierliche Unterstützung während meiner gesamten Lehrstuhlzeit, sein entgegengebrachtes Vertrauen sowie die Möglichkeit der Anfertigung der vorliegenden Dissertation. Besonders geschätzt habe ich die Freiheiten hinsichtlich der Gestaltung meines Forschungsthemas. Zudem bedanke ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Hartmut Zadek für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferats sowie Herrn Professor Dr. rer. nat. Tim C. Lüth für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Den Rahmen dieser Arbeit bildete ein Forschungsprojekt zusammen mit der BMW Group, ohne die die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nicht möglich gewesen wären. Für diese Möglichkeit bedanke ich mich herzlich. Hervorheben möchte ich besonders Herrn Marco Prüglmeier und Herrn Dr.-Ing. Thomas Irrenhauser.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl fml für das äußerst freundschaftliche und kollegiale Arbeitsklima. Insbesondere gilt mein Dank den Kollegen Dr.-Ing. Felix Top und Christopher Mayershofer sowie meiner Mentorin Dr.-Ing. Eva Klenk für die konstruktiven Diskussionen und die fachlichen Anregungen. Zudem danke ich allen Studentinnen und Studenten, die einen Beitrag zu meiner Forschungsarbeit geleistet haben.

Schließlich danke ich meiner Familie, meinen Freunden und besonders meinem Ehemann Juan Pablo für seine verständnisvolle Unterstützung und seine Bestätigung während meiner gesamten Dissertation, woraus ich die notwendige Energie und Ausdauer schöpfte.

München, im Januar 2023

Dana Díaz Torres

Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Flexibilisierung und Verbesserung der Transporte auf dem Werksgelände durch den Einsatz autonomer mobiler Roboter

Dana Díaz Torres

Autonome mobile Roboter für den Waren- und Materialtransport in der Intralogistik bieten das Potenzial – neben der selbständigen Ausführung des Transports – auch Entscheidungen in einem vorgegebenen Entscheidungskontext eigenständig zu treffen. Dadurch können komplexe Logistikaufgaben vom Roboter übernommen werden. Die Implementierung solcher vielseitiger Systeme, welche zu einer höheren Autonomiestufe als konventionelle fahrerlose Transportsysteme aufweisen und zum anderen nicht nur innerhalb, sondern auch außerhalb der Gebäude auf einem Werksgelände fahren, stellt aktuell eine Planungsherausforderung dar. Die fehlende Expertise im Hinblick auf technische, organisatorische und prozessuale Aspekte autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich ist hier besonders hervorzuheben. Zwar können Erkenntnisse selbstfahrender Kraftfahrzeuge und autonomer mobiler Anwendungen im Indoor-Bereich teilweise übernommen werden, allerdings sind die Anforderungen nicht eins zu eins auf ein Werksgelände übertragbar, vor allem auch in Bezug auf rechtliche, geografische und sicherheitstechnische Anforderungen.

In der vorliegenden Forschungsarbeit wurde daher ein Vorgehensmodell für die Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände entwickelt. Den Kern des Vorgehensmodells bildet die Entwurfsmethode Axiomatic Design, welche die strukturierte Suche und Zuordnung geeigneter Lösungen für zuvor festgelegte Anforderungen beinhaltet. Nach den Grundlagen und der Diskussion bestehender Modelle und Methoden für das Vorgehen sind im Rahmen der Konzeption zunächst Kundenanforderungen, welche auf qualitativen Interviews, einer Prozessanalyse und dem aktuellen Stand der Wissenschaft basieren, generiert worden. Anhand der systematischen Suche und Zuordnung sowie der Ergänzung um Metriken liefert Axiomatic Design einen auf Kundenanforderungen basierenden Gestaltungsentwurf. Im Zuge einer demonstratorischen Umsetzung bei einem Automobilhersteller wurde dieser Entwurf in konkrete Gestaltungsrichtlinien überführt. Diese Gestaltungsrichtlinien wiederum bieten Anwendern und Herstellern eine fundierte Planungsgrundlage und -unterstützung bei der Einführung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände.

Abstract

Development of a design approach to increase flexibility and improve transports on the factory premises using autonomous mobile robots

Dana Díaz Torres

Autonomous mobile robots for transporting goods and materials in intralogistics do not only carry out transport orders independently, but also offer the potential to make decisions independently in a predefined decision context. This means that complex logistics tasks can be performed by the robot. The implementation of such intricate systems, which on the one hand have higher levels of autonomy than conventional automated guided vehicles and on the other hand do not only operate inside but also outside the buildings on factory premises, is linked to a significant increase in complexity, which currently poses a challenge. The lack of expertise with regard to technical, organizational as well as procedural aspects of autonomous mobile robots in the outdoor area is particularly noteworthy here. Although the knowledge gained from self-driving vehicles and autonomous mobile applications in the indoor area can be partially adopted, the requirements cannot be transferred one-by-one to the factory premises, especially in terms of legal, geographical and safety requirements.

In the present research work, a design approach was therefore developed for the implementation of autonomous mobile robots on the factory premises. The key element of the design approach is Axiomatic Design, which provides a design concept based on customer needs using the systematic search and mapping of solutions of previously defined requirements. After an introduction to the fundamentals and the discussion of existing models and methods for the general approach, customer requirements have been determined. These are based on semi-structured interviews, a process analysis and the state of the art. Axiomatic Design delivers a design concept based on customer requirements using the systematic search and mapping and enhanced with metrics. This concept was translated into concrete design guidelines as part of a demonstrative implementation at an automotive manufacturer. These design guidelines provide users and manufactures a well-founded planning basis and support for the implementation of autonomous mobile robots on factory premises.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Kurzdarstellung	III
Abstract	V
Inhaltsverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	XI
Formelzeichenverzeichnis	XV
1 Einleitung	1
1.1 Automatisierte und autonome Flurförderzeuge – Gemeinsamkeiten und Unterschiede	1
1.2 Motivation zur Einführung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich	2
1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit	4
2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft	7
2.1 Eigenschaften der involvierten Teilgebiete	7
2.1.1 Betriebsgelände im Rahmen der Intralogistik	7
2.1.2 Grundlagen zu fahrerlosen Transportsystemen	9
2.1.3 Eigenschaften von selbstfahrenden Kraftfahrzeugen	22
2.1.4 Einführung und Begriffsdefinition autonomer mobiler Roboter	25
2.2 Diskussion bestehender Modelle und Methoden	35
2.2.1 Grundlagen zu Vorgehensmodellen	35
2.2.2 Phasenbezogene Vorgehensmodelle	36
2.2.3 Designtheorien und -methoden	41
2.2.4 Grafische Modellierungssprachen	49
2.3 Forschungsbedarf und Aufgabenstellung	54
2.3.1 Abgrenzung des Forschungsbedarfs	54
2.3.2 Aufgabenstellung	58
3 Prozessanalyse von Transporten auf dem Werksgelände am Beispiel eines Automobilherstellers	61
3.1 Gegenstand der Analyse – Das BMW-Werk München	61

3.2	Ist-Analyse von Transportprozessen auf dem Werksgelände	62
3.2.1	Layouterfassung	62
3.2.2	Prozessidentifikation	64
3.2.3	Prozessbeschreibung und -visualisierung	68
3.2.4	Prozessbeurteilung	72
3.3	Herleitung von Referenzprozessbausteinen	75
3.3.1	Identifizierung und Beschreibung der Referenzprozessbausteine	75
3.3.2	Definition der Prozessziele	78
3.3.3	Visualisierung der Referenzprozessbausteine	81
4	Konzeption des Vorgehensmodells unter Verwendung von Axiomatic Design	85
4.1	Strukturierung und Bestandteile des Modells	85
4.2	Ermittlung der Kundenwünsche und Festlegung der Restriktionen	87
4.2.1	Literaturübersicht	87
4.2.2	Prozessanalyse	88
4.2.3	Qualitative Interviews	88
4.2.4	Repräsentative Kundenwünsche	90
4.2.5	Festlegung von Restriktionen	92
4.3	Überführung der Kundenwünsche in funktionale Anforderungen auf oberster Ebene	93
4.4	Anwendung funktionaler Metriken auf oberster Ebene	94
4.5	Zuordnung der Gestaltungsparameter zu den funktionalen Anforderungen auf oberster Ebene	96
4.6	Dekomposition und Zuordnung der einzelnen Gestaltungsfelder unter Anwendung funktionaler Metriken	98
4.6.1	Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung	98
4.6.2	Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit	103
4.6.3	Gestaltungsfeld 3 – Sicherheitsmanagement	111
4.6.4	Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement	115
4.6.5	Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit	119
4.7	Erstellung der Gesamt-Design Matrix	125
4.8	Zusammenfassung und Visualisierung des Vorgehensmodells in Form von Gestaltungsrichtlinien	127
4.9	Überführung der Gestaltungsrichtlinien in Checklisten für die praktische Anwendung	131

5	Demonstratorische Umsetzung der Gestaltungsrichtlinien am Beispiel eines Automobilherstellers	133
5.1	Vorgehensweise und Betrachtungsgegenstand	133
5.2	Anwendung der Gestaltungsrichtlinien für die Pilotierung des TractEasy im BMW-Werk Dingolfing	135
5.2.1	Prozessanalyse auf dem Werksgelände	136
5.2.2	Technische Machbarkeitsprüfung	140
5.2.3	Umfassendes Sicherheitssystem	144
5.2.4	Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem	147
5.2.5	Kostenanalyse	150
5.3	Reflexion und Diskussion der Anwendung der Gestaltungsrichtlinien in Form von Checklisten	154
6	Zusammenfassung und Ausblick	159
6.1	Zusammenfassung	159
6.2	Weiteres Forschungspotenzial	161
6.3	Ausblick im Bereich autonomer mobiler Roboter	162
	Literaturverzeichnis	167
	Abbildungsverzeichnis	193
	Tabellenverzeichnis	197
Anhang A	Ergänzungen zu Kapitel 3: Ist-Analyse	A-1
A.1	Prozessvisualisierung mit BPMN	A-1
A.2	Prozessbeurteilung mit SWOT-Analysen	A-9
Anhang B	Ergänzungen zu Kapitel 4: Axiomatic Design	B-1
B.1	Dekomposition FR-DP-FM	B-1
B.2	FR-DP-Baumstruktur (Tree Chart)	B-5
B.3	Gesamt Design Matrix	B-14
Anhang C	Ergänzungen zu Kapitel 5: Umsetzung	C-1
C.1	Vorlagen der Checklisten	C-1
C.2	Kapitalwertmethode	C-5

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ALFUS	Autonomy Levels for Unmanned Systems
AMR	Autonomous Mobile Robot
ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BPEL	Process Execution Language
BPMN	Business Process Model and Notation
CAN	Controller Area Network
CN	Customer Need
CN-I	Customer Need – Qualitative Interviews
CN-L	Customer Need – Literaturübersicht
CN-P	Customer Need – Prozessanalyse
CPU	Central Processing Unit
DFE	Design for Environment
DFM	Design for Manufacture
DFX	Design for X
DP	Design Parameter
DSM	Design Structure Matrix

eEPK	Erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskette
EPK	Ereignisgesteuerte Prozessketten
ERP	Enterprise-Resource-Planning
FFZ	Flurförderzeug
FM	Functional Metric
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FR	Functional Requirement
FTF	Fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	Fahrerloses Transportsystem
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
IBC	Intermediate Bulk Container
IFR	International Federation of Robotics
IIR	Infinite Impulse Response
IMU	Inertial Measurement Unit
IoT	Internet of Things
JIT	Just-in-Time
KI	Künstliche Intelligenz
LAN	Local Area Network
LiDAR	Light Detection and Ranging
LORA	Levels of Robot Autonomy

LTE	Long Term Evolution
MA	Masterarbeit
MES	Manufacturing Execution System
MTBF	Mean Time Between Failures
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OMG	Object Management Group
PHS	Press-hardened steel
PL	Performance Level
PSA	Peugeot Société Anonyme
PV	Process Variable
QFD	Quality Function Deployment
RGB-Daten	Rot-Grün-Blau-Daten
ROI	Return on Investment
RTK dGPS	Real Time Kinematic differential GPS
SA	Semesterarbeit
SAE	Society of Automotive Engineers
SIL	Safety Integrity Level
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping
SLT	Sonderladungsträger
StVO	Straßenverkehrsordnung
SWOT	Strengths Weaknesses Opportunities Threats

ToF	Time-of-Flight
UL	Underwriters Laboratories
ULT	Universalladungsträger
UML	Unified Modelling Language
VDA	Verband der Automobilindustrie
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
VUCA	Volatility Uncertainty Complexity Ambiguity
WLAN	Wireless Local Area Network

Formelzeichenverzeichnis

Die in dieser Arbeit verwendeten Formelzeichen sind in der nachfolgenden Tabelle in alphabetischer Reihenfolge zusammengestellt.

Formelzeichen	Bedeutung
A_t	Auszahlung in Periode t
A_0	Investitionsauszahlung
K	Kapitalwert
E_t	Einzahlung in Periode t
i	Kalkulationszinssatz
n	Nutzungsdauer der Investition
t	Periode

1 Einleitung

1.1 Automatisierte und autonome Flurförderzeuge – Gemeinsamkeiten und Unterschiede

Flurförderzeuge (FFZ) gelten seit jeher als etabliertes Fördermittel zum Transport von Gütern. Sie dienen dem Menschen als Arbeitsmittel und kommen in Form von Staplern, Routenzügen oder Schleppern zum Einsatz. Dabei stellen sie einen elementaren Bestandteil der Logistik dar, denn in der Logistik werden neben dem Transport auch Güter umgeschlagen, gelagert, bereitgestellt, beschafft und verteilt. Findet dieser logistische Waren- und Materialfluss ausschließlich auf einem Betriebsgelände statt, so wird von Intralogistik gesprochen. Der Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau (VDMA) definiert die Intralogistik als *„die Organisation, Steuerung, Durchführung und Optimierung des innerbetrieblichen Waren- und Materialflusses, der Informationsströme sowie des Warenumschlags in Industrie, Handel oder öffentlichen Einrichtungen“* [Arn-2006, S. 13]. Klassische FFZ unterstützen Menschen demnach bei der Durchführung des innerbetrieblichen Waren- und Materialflusses. Nach der Unfallverhütungsvorschrift zeichnen sich FFZ dadurch aus, dass *„sie mit Rädern auf Flur laufen und frei lenkbar sind, zum Befördern, Ziehen oder Schieben von Lasten eingerichtet und zur innerbetrieblichen Verwendung bestimmt sind“* [BGV-D27, S. 8].

Eine bereits standardisierte Weiterführung des klassischen FFZ stellt das automatisierte FFZ dar, besser bekannt als fahrerloses Transportfahrzeug (FTF) [Ull-2019]. FTF führen den logistischen Waren- und Materialfluss, wie etwa den Transport, automatisiert aus. Sie bestehen aus einer Leitsteuerung, Einrichtungen zur Standortbestimmung und Lageerfassung, Einrichtungen zur Datenübertragung sowie Infrastruktur und peripheren Einrichtungen [VDI-2510, S. 6]. Die Leitsteuerung der FTF ist zudem in der Lage, logistische Aufgaben zu organisieren und zu steuern, beispielsweise in Form der Auftragsvergabe. Allerdings müssen diese Leitsteuerungen vom Menschen überwacht und mit Daten angereichert werden [Sin-2017, S. 2]. Dieses Gesamtsystem, auch als „fahrerloses Transportsystem“ (FTS) bezeichnet, ist in der Lage, Prozesse zu optimieren, beispielsweise im Hinblick auf die Kosten [Sab-2013, S. 203]. Allerdings erweist es sich heutzutage als zu unflexibel und abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall. FTS sind auf den Input des Menschen angewiesen. Sie fahren einprogrammierte Strecken von vorgegebenen Aufträgen ab. Das Verhalten von FTS ist also von vornherein vom Menschen festgelegt. Sind FTS hingegen in der Lage, ihre Umgebung wahrzunehmen und demzufolge Entscheidungen, beispielsweise über die

Fahrstrecke selbst zu treffen, so wird von autonomen FFZ, besser bekannt als autonome mobile Roboter (*engl. Autonomous Mobile Robot, AMR*) gesprochen [Kau-2021] [Fel-2018, S. 2].

Durch technologischen Fortschritt, erhöhte Rechenkapazitäten, digitale Vernetzung sowie intensive Auseinandersetzung mit künstlicher Intelligenz (KI) in Forschung, Wissenschaft und Praxis rücken AMRs verstärkt in den Fokus aktueller Diskussionen und Debatten zur Automatisierung bzw. Autonomisierung logistischer Waren- und Materialflüsse [Com-2020, S. 33ff.]. AMRs werden häufig als Transportfahrzeuge von Materialien verstanden, die autonom von einem Ort zum anderen navigieren können, um bestimmte Aufgaben zu erfüllen [Oye-2020, S. 1]. Somit können sie als eine Weiterentwicklung eines klassischen FTS verstanden werden. Ihr Ziel ist es, weiterhin die logistischen Grundaufgaben zu erfüllen, allerdings benötigen sie hierfür deutlich weniger Eingabeparameter und demzufolge weniger Entscheidungen des Menschen im Betrieb.

1.2 Motivation zur Einführung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich

Die Automobilindustrie ist ein Vorreiter im Bereich der Automatisierung. Im Vergleich zu den in Abbildung 1-1 dargestellten Branchen wurden in der Automobilindustrie weltweit von 2017 bis 2019 die meisten Industrieroboter installiert. Zu diesen Industrierobotern zählen nach dem World Robotics Report der International Federation of Robotics (IFR) automatisch gesteuerte und programmierbare Roboter für den Einsatz in der industriellen Automation.

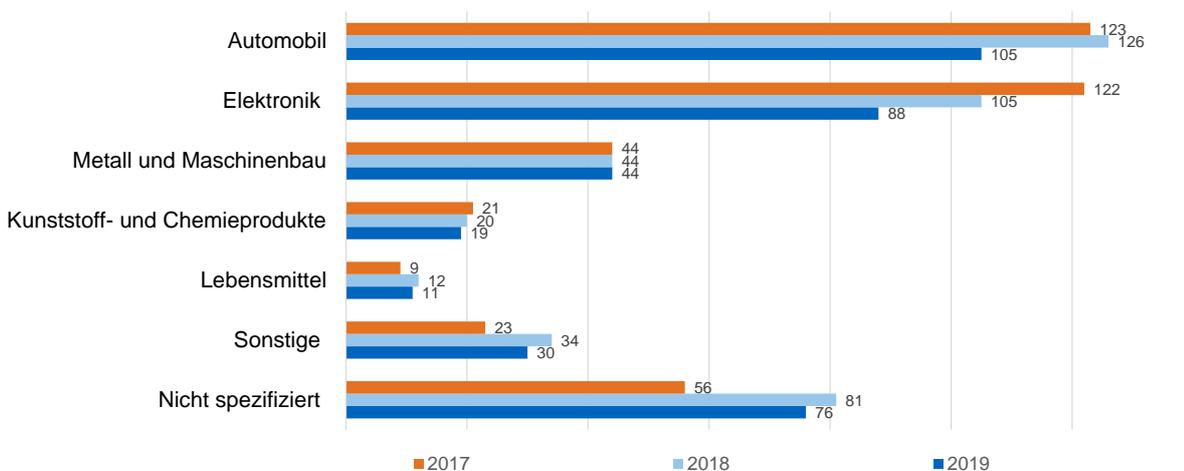


Abbildung 1-1: Jährliche Installationen von Industrierobotern nach Kundenindustrien weltweit (in 1.000 Einheiten) [IFR-2020, S. 14]

Des Weiteren lässt sich aus dem World Robotics Report ein Vergleich von unterschiedlichen Robotern entnehmen. Demnach verzeichnen Logistikroboter einen größeren Absatz im Vergleich zu Robotern im öffentlichen Raum und Militärrobotern. Von 2018 bis 2019 betrug dieser durchschnittlich 64.000 Einheiten. Roboter im öffentlichen Raum beliefen sich allerdings nur auf durchschnittlich 17.000 sowie Militärrobotern auf durchschnittlich 18.000 Einheiten. Ebenfalls liegt der prognostizierte Absatz von 2020 bis 2023 im Bereich der Logistikroboter deutlich über dem der beiden anderen Bereiche. Nach dem World Robotics Report stellt die Logistik somit die am schnellsten wachsende Branche für Logistikroboter dar [Sha-2018] [IFR-2020, S. 25].

Diese Zunahme wird durch die immer komplexer werdenden Logistikstrukturen verursacht. Gründe hierfür sind vor allem der demografische Wandel, dynamische und volatile Märkte, kürzere Produktlebenszyklen, zunehmende Produktvielfalt und eine abnehmende Fertigungstiefe [Ael-2013, S. 79]. Dabei findet ein Großteil der Anwendungen von Logistikrobotern im Indoor-Bereich statt. Zudem sind sie oftmals automatisiert, wie z. B. in Hafenterminals oder im Agrarbereich, aber nicht autonom [Ull-2019, S. 1ff.]. Das bedeutet, dass sie über keine Eigenschaften autonom agierender Systeme verfügen, wie beispielsweise selbständig mit der Umwelt zu interagieren [Lin-2020, S. 65].

Des Weiteren weisen Umgebungen im Freien häufig sehr variable Geländeeigenschaften und unterschiedliche Witterungszustände auf. Auf Betriebsgeländen herrschen zudem erhöhte Geschwindigkeiten der Verkehrsteilnehmer sowie eine höhere Anzahl unterschiedlicher Verkehrsteilnehmer als im Indoor-Bereich. Dadurch ergeben sich für den Outdoor-Bereich eines Betriebsgeländes erhöhte Sicherheitsanforderungen und eine zusätzliche Komplexität, die zusammen mit den bereits erwähnten Herausforderungen robuste und „*smarte*“ Materialflusslösungen erfordert [Cla-2021b, S. 1f.].

Die aktuelle Roadmap für U.S. Robotics prognostiziert, dass bis zum Jahr 2035 autonome Fahrzeuge in der Lage sein werden, in unterschiedlichen Umgebungen zu fahren, in denen auch Menschen fahren können [Com-2020, S. 49]. Ein wesentlicher Ansatz diese Hypothese zu belegen, ist ein Paradigmenwechsel von zentralisierten, hierarchischen Organisationsprinzipien und -strukturen, wie es etwa FTS darstellen, hin zu dynamischen, vernetzten, autonomen Systemen, die miteinander kooperieren und sich selbst in dynamisch verändernden Umgebungen optimieren können [Fot-2021, S. 2].

Das Potenzial von Outdoor-AMRs ist sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis erkennbar, allerdings fehlt es an konkreten Planungs- und Implementierungsschritten

[Com-2020] [Lin-2020]. Bereits existierende Richtlinien, wie etwa die VDI-2510, beziehen sich ausschließlich auf FTS im Indoor-Bereich [VDI-2510]. In der Praxis wird in der Regel auf bereits bekannte Implementierungsvorgehen zurückgegriffen. Diese entsprechen jedoch nicht vollumfänglich den Anforderungen eines AMR im Outdoor-Bereich, da es in der Planung und Umsetzung an z. B. technischer Expertise und sicherheitstechnischen Aspekten zu Outdoor-AMRs mangelt. Somit ziehen sich Implementierungsvorhaben aufgrund fehlender Richtlinien, Vorschriften und Expertise in die Länge und verursachen dadurch höhere Kosten. Basierend auf dieser Ausgangssituation sowie dem enormen Potenzial von AMRs in der nahen und fernerer Zukunft, will die vorliegende Forschungsarbeit ansetzen und Antworten auf folgende Frage liefern:

Wie lassen sich autonome mobile Roboter auf dem Werksgelände vor dem Hintergrund der Flexibilisierung und Verbesserung der Transporte und unter Berücksichtigung der prozessualen, technischen, sicherheits- und steuerungsspezifischen sowie wirtschaftlichen Aspekte implementieren?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage soll ein Vorgehensmodell, welches eine Zusammenstellung mehrerer Methoden darstellt, Hilfestellung bieten. Schwerpunkt ist dabei die Entwurfsmethode Axiomatic Design. Durch die strukturierte Suche und Zuordnung geeigneter Lösungen für Anforderungen, welche zuvor von Kundenwünschen abgeleitet und festgelegt werden, wurden Planungsschritte in Form von Gestaltungsrichtlinien für die prozessuale, technische, sicherheits-, auftrags- und kostenbezogene Implementierung von AMRs auf dem Werksgelände entwickelt. Diese können zum einen von Anwendern als Unterstützung für die Planung und Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände und zum anderen von Herstellern als Richtlinien für die Gestaltung von AMRs genutzt werden. Somit ermöglichen die Gestaltungsrichtlinien eine Harmonisierung der Kunden- und Herstellerperspektive bei der Implementierung und Gestaltung von AMRs im Outdoor-Bereich. Dies schließt eine wesentliche Lücke im Bereich der Planung und Implementierung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich und führt demnach zu einer Ressourceneinsparung auf Kunden- und Herstellerseite.

1.3 Aufbau und Struktur der Arbeit

Der Aufbau dieser Forschungsarbeit orientiert sich an der in Abbildung 1-2 dargestellten Struktur. Demnach wird in Kapitel 1 die Motivation der Forschungsarbeit dargelegt. Kapitel 2 gliedert sich in drei Abschnitte. Zunächst werden die Eigenschaften der involvierten Teilgebiete erläutert. Diese umfassen das Betriebsgelände im Rahmen der Intralogistik, Grundlagen zu FTS, Eigenschaften selbstfahrender Kraftfahrzeuge sowie

die Einführung und Begriffsdefinition autonomer mobiler Roboter. Diese vier Teilgebiete bilden die Grundlage und zugleich auch den Betrachtungshorizont dieser Arbeit. Anschließend werden in der Literatur beschriebene Modelle und Methoden als Grundlage für das entwickelte Vorgehensmodell vorgestellt und diskutiert. Mithilfe von Bewertungen der einzelnen Ansätze wird daraufhin ein Methoden-Mix in Form eines Vorgehensmodells im Hinblick auf die zuvor beschriebene Implementierungsaufgabe erstellt. Der dritte Abschnitt in Kapitel 2 fasst den Forschungsbedarf zusammen und erläutert die konkrete Aufgabenstellung dieser Arbeit, welche in Form von Forschungsfragen dargestellt wird.

Die Entwicklung des Vorgehensmodells besteht aus drei wesentlichen Schritten. Zunächst wird in Kapitel 3 eine Prozessanalyse von Transporten auf dem Werksgelände am Beispiel eines Automobilherstellers durchgeführt. Die Prozessanalyse liefert entscheidende Erkenntnisse für die Konzeption des Modells, insbesondere in Bezug auf die Vielfalt von Outdoor-Transportprozessen sowie deren typischen Prozessabfolgen und Ressourcen. Zusammengefasst und abstrahiert werden diese Erkenntnisse mit Referenzprozessbausteinen. Basierend auf diesen Bausteinen folgt in Kapitel 4 die Konzeption des Vorgehensmodells. Kernbestandteil dieses Kapitels ist die Anwendung der Methode Axiomatic Design. Die Durchführung von Axiomatic Design wird in Zusammenarbeit mit einem Expertenteam erfolgen und um Metriken für die Messung und Qualität der funktionalen Anforderungen ergänzt. Den dritten Schritt bildet Abschnitt 4.6 mit den Dekompositionen und Zuordnungen konkreter Lösungsparameter zu den funktionalen Anforderungen. Diese Lösungsparameter in Form von Planungsschritten beantworten die in Kapitel 2 formulierten Forschungsfragen. Die einzelnen Planungsschritte lassen sich den fünf Gestaltungsfeldern: Prozess, Technik, Sicherheit, Planung und Steuerung sowie Kosten zuordnen. Die Zusammenfassung und Visualisierung der einzelnen Lösungsparameter erfolgt in Form von Gestaltungsrichtlinien am Ende von Kapitel 4.

Ausgehend von den fünf detailliert beschriebenen Gestaltungsfeldern folgt in Kapitel 5 die demonstratorische Umsetzung der Gestaltungsrichtlinien in Form von Checklisten am Beispiel eines Automobilherstellers. Hierzu wird die Planung für die Implementierung eines autonomen Trailerzugs auf dem Werksgelände mithilfe der erarbeiteten Checklisten sowie in Zusammenarbeit mit dem Anwender und Hersteller durchgeführt. Eine Reflexion und Diskussion schließen das Kapitel 5 ab. Hier wird geprüft, inwieweit die Gestaltungsrichtlinien den zuvor definierten funktionalen Anforderungen entsprechen und wie adäquat sie in der Praxis angewandt werden können.

Schließlich liefert Kapitel 6 die Zusammenfassung in Form einer kritischen Würdigung der in dieser Forschungsarbeit erzielten Ergebnisse, einen Ausblick auf weiteren Forschungs- und Handlungsbedarf sowie einen Blick in die Zukunft im Bereich der AMR.

Fokus	Kapitel der Forschungsarbeit
Motivation, Stand der Wissenschaft und Forschungsfragen	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="448 461 491 495">1 <li data-bbox="496 461 603 495">Einleitung <li data-bbox="448 528 491 562">2 <li data-bbox="496 528 979 562">Stand der Wissenschaft und Aufgabenstellung
Entwicklung des Vorgehensmodells und Ergebnis	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="448 616 491 649">3 <li data-bbox="496 616 1283 663">Prozessanalyse von Transporten auf dem Werksgelände am Beispiel eines Automobilherstellers <li data-bbox="448 685 491 719">4 <li data-bbox="496 685 1291 719">Konzeption des Vorgehensmodells unter Verwendung von Axiomatic Design
Validierung und Anwendung des Modells	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="448 770 491 804">5 <li data-bbox="496 770 1286 817">Demonstratorische Umsetzung der Gestaltungsrichtlinien am Beispiel eines Automobilherstellers
Fazit	<ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="448 873 491 907">6 <li data-bbox="496 873 839 907">Zusammenfassung und Ausblick

Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Stand der Wissenschaft

2.1 Eigenschaften der involvierten Teilgebiete

Zur zielgerichteten Bearbeitung der Forschungsarbeit ist es erforderlich, zunächst die grundsätzlichen Voraussetzungen und Eigenschaften der involvierten Teilgebiete darzulegen. Im Fall der vorliegenden Arbeit sind dies die Umgebung eines Betriebsgeländes mit besonderem Fokus auf den Outdoor-Einsatz, Grundlagen zu FTS, Eigenschaften von selbstfahrenden Kraftfahrzeugen sowie die Einführung und Begriffsdefinition autonomer mobiler Roboter. Zu diesem Zweck wird eine Analyse der vorhandenen Literatur zu diesen Thematiken durchgeführt sowie eine gegenseitige Abhängigkeit und Einflussnahme der einzelnen Teilgebiete untersucht. Dadurch soll festgestellt werden, ob die Notwendigkeit zur Durchführung der Forschungsarbeit im Sinne guter wissenschaftlicher Praxis gegeben ist oder bereits entsprechende Untersuchungen ähnlichen Inhalts vorliegen. Des Weiteren werden jene Komponenten und Eigenschaften der beteiligten Subgebiete schwerpunktmäßig diskutiert, die für den Einsatz autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich eine entscheidende Rolle spielen [fml-2018, S. 9].

2.1.1 Betriebsgelände im Rahmen der Intralogistik

Betriebsgelände, beispielsweise in Form von Werksgeländen, gehören zu den häufigsten Einsatzgebieten autonomer mobiler Roboter. Ein Betriebsgelände ist *„ein abgegrenzter Teil der Erdoberfläche, auf dem sich Anlagen, Geschäftseinrichtungen oder Betriebsbereiche befinden, die in räumlichem, technischem oder betrieblichem Zusammenhang stehen und der Aufsicht oder Verfügungsgewalt einer natürlichen oder juristischen Person (Betreiber) unterliegen“* [Min-2014]. Grundsätzlich besteht in Deutschland keine generelle Regelung zur Einzäunung eines Betriebsgeländes, es muss jedoch gewährleistet sein, dass Unbefugte das Gelände nicht ohne Weiteres betreten können, daher ist eine Einzäunung üblich. Zudem befinden sich häufig an Werkseingängen und -toren Beschilderungen mit dem Hinweis, der Straßenverkehrsordnung (StVO) Folge zu leisten. Transportfahrzeuge, wie Schlepper oder Zugmaschinen, die das Werksgelände nicht verlassen, besitzen üblicherweise keine Zulassung oder Kennzeichen. Es liegt jedoch in der Verantwortung des Betreibers, die Verkehrssicherung und Verkehrssicherheit auf seinem Betriebsgelände zu gewährleisten. Häufig dient die StVO hierbei als Grundlage. Es gelten demnach dieselben Verkehrsregeln wie im öffentlichen Straßenverkehr, beispielsweise in Bezug auf Kreuzungen mit/ohne Ampeln, Verkehrsschildern oder Rechts-vor-links-Regelungen.

Des Weiteren können sich auf Betriebsgeländen Bahngleise befinden, die entweder mit einem Andreaskreuz oder einer Schrankenanlage versehen sind. Die EG-Richtlinie 89/654/EWG enthält Regelungen von Verkehrswegen und Gefahrenbereichen auf Betriebsgeländen [EG-89]. Unter anderem beinhaltet diese Richtlinie die Pflicht des Betreibers zur Beseitigung von Stolperstellen und Schlaglöchern sowie zum Einsatz eines Winterdienstes. Häufig ist der Betreiber auch der Arbeitgeber, der sicherheitsrelevante Pflichten an seine Fachkraft für Arbeitssicherheit überträgt. Diese Fachkraft prüft, veranlasst und genehmigt sicherheitsrelevante Vorhaben innerhalb eines Betriebs. Betrieblich genutzte Fahrzeuge, wie LKW, PKW oder FFZ sind Arbeitsmittel und demzufolge Arbeitsplätze [Län-2020, S. 12]. Somit unterliegen sie den Vorgaben aus dem Arbeitsschutzrecht, welche Unterweisungen sowie Betriebsanweisungen beinhalten [Bun-1996].

Als Teilbereich der Arbeitssicherheit ist die Verkehrssicherheit Thema einer Gefährdungsbeurteilung. Somit ist die Fachkraft für Arbeitssicherheit sowohl für die Verkehrssicherheit als auch Verkehrssicherung verantwortlich. Je nach Fahrbahneigenschaften und Verkehrslage legt diese Fachkraft die Höchstgeschwindigkeit von LKW, PKW und FFZ fest. In der Regel liegt die Maximalgeschwindigkeit für LKW und PKW bei 30 km/h und für FFZ im Außenbereich bei maximal 16 km/h. Die Unfallverhütungsvorschrift der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung 68 §12 Abs. 2 „*Flurförderzeuge*“ besagt, dass FFZ nur mit an die Fahrbahnverhältnisse angepasster Geschwindigkeit fahren dürfen [Deu-2011].

Regelungen für das Betriebsgelände gelten nicht nur für den Straßen-, sondern auch für den Personenverkehr. Für Fußgänger werden, abhängig von der Intensität des Verkehrsaufkommens, Übergänge und definierte Bereiche geschaffen, in denen ein sicheres Gehen auf dem Betriebsgelände möglich ist. Zusätzlich ist vielerorts besondere Schutzkleidung, wie beispielsweise Warnwesten und Sicherheitsschuhe, vorgeschrieben. Ein weiteres Merkmal der Umgebung eines Betriebsgeländes ist der beschränkte Kreis an Personen, die den Betrieb betreten. Im öffentlichen Straßenverkehr müssen alle möglichen Ausprägungen des Verkehrs Beachtung finden. Die Einschränkungen, die für ein Betriebsgelände an dieser Stelle zu treffen sind, sind vielfältig und reichen vom Ausschluss spielender Kinder bis zur Abwesenheit landwirtschaftlichen Verkehrs.

Ausgehend von der Definition von Betriebsgeländen, wozu auch Werksgelände gehören, wird nachfolgend der Begriff der Intralogistik innerhalb eines Betriebs kurz erläutert. Die Intralogistik umfasst alle Aufgaben, die sich im engeren und im weiteren Sinne auf den innerbetrieblichen Waren- und Materialfluss beziehen. Hierbei sind drei Aspekte hervorzuheben. Zum einen sind Materialflüsse ohne die dazugehörigen Informa-

tionsströme undenkbar. Zum zweiten bezeichnet „*innerbetrieblich*“ verschiedene Betriebe, wie z. B. Fabriken, Werke, Distributionszentren oder Häfen und zuletzt wirken im Bereich der Intralogistik unterschiedliche Akteure mit, wie unter anderem Lieferanten, Systemplaner, Hard- und Softwareentwickler sowie Wissenschaftler [Arn-2006, S. 1]. Ziel der Intralogistik ist die Bereitstellung der richtigen Materialien und Werkzeuge in der richtigen Qualität und Menge zur richtigen Zeit am richtigen Ort zu möglichst geringen Kosten. Dabei ist das Be- und Verarbeiten des Materials auf einer Bearbeitungsmaschine nicht Bestandteil der Intralogistik, wohl aber die vor- bzw. nachgelagerten Tätigkeiten, wie die Versorgung, Entsorgung, Planung und Steuerung der Produktion [Mar-2014, S. 9]. Das Zusammenspiel und die Wirkung von technischen und informatorischen Faktoren wie der Verpackung, dem Transport, der Lagerung und Kommissionierung sind Hauptbestandteile [Mar-2014, S. 1ff.]. Die Intralogistik umfasst die betriebsstättenbezogenen Aufgabenbereiche der Beschaffungs-, Produktions- sowie Distributionslogistik und ist zu unterscheiden von der externen Logistik, welche den Transport von Gütern außerhalb eines Betriebs und zwischen Unternehmen berücksichtigt.

2.1.2 Grundlagen zu fahrerlosen Transportsystemen

FTS sind „*innerbetriebliche, flurgebundene Fördersysteme mit automatisch gesteuerten Fahrzeugen, deren primäre Aufgabe der Materialtransport, nicht aber der Personentransport ist. Sie werden innerhalb und außerhalb von Gebäuden eingesetzt*“ [VDI-2510-2, S. 2]. Ein einzelnes automatisch gesteuertes Fahrzeug wird als FTF bezeichnet.

Bereits Mitte des 20. Jahrhunderts fand das FTF Einzug in die Intralogistik und ist seitdem Bestandteil von Produktionssystemen. Die Entwicklung des FTF lässt sich in vier Epochen unterteilen. Die Firma Barrett-Cravens of Northbrook aus den USA hat mit ihrem automatisierten Schlepper für Sammeltransporte im Indoor-Bereich das Zeitalter des FTF eingeläutet. Bereits dieses FTF zeichnete sich durch auch heute noch bekannte Merkmale aus. So besaß es Elektronik für die Steuerung, eine spurgeführte Navigation entlang eines stromdurchflossenen Leiters im Boden sowie Personenschutzkomponenten, wie ein Bumper an der Stirnseite des Schleppers [Ull-2019, S. 2].

Die zweite Evolutionsstufe, die sich über die 1970er bis zum Beginn der 1990er Jahre erstreckte, wurde durch die Automatisierungseuphorie geprägt und spiegelte sich hauptsächlich in Anwendungen der Automobilindustrie wider. Die Elektronik wurde in einfache Bordrechner und komplexe Schaltschränke überführt. Zudem setzte sich die induktive Spurführung mithilfe eines Drahts im Boden durch. Erstmals wurde neben Draht und Infrarot auch Funk für die Datenübertragung genutzt [Ull-2011, S. 2ff.].

Daraufhin wurden in der dritten Epoche neue Standards bezüglich der Navigation und Datenübertragung geschaffen. Die Navigation entwickelte sich von einer spurgebundenen zu einer freien Navigation. Hierbei werden keine Drähte, Transponder oder Magnete im Boden verlegt, sondern verschiedene Sensoren, wie beispielsweise Light Detection and Ranging (LiDAR), für die Lokalisierung und Navigation verwendet. Zudem wurde das Anwendungsfeld von der Automobilindustrie auf weitere Industriezweigen ausgeweitet [Ull-2019, S. 3ff.].

Die vierte Epoche, welche ca. im Jahr 2010 begonnen hat und immer noch anhält, ist vor allem von den Begriffen Digitalisierung und Industrie 4.0 geprägt. Es wird auch als Zeitalter der digitalen Transformation und Vernetzung bezeichnet. Im Zuge dessen spielt auch die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine eine immer größere Rolle. Klassische Roboterzellen weichen sogenannten Cobots. „Cobot“ setzt sich aus den englischen Wörtern „collaborative“ und „robot“ zusammen. Sie ermöglichen eine enge Zusammenarbeit und Vernetzung von Mensch und Maschine, nicht nur mit geschulten Mitarbeitern, sondern auch mit unerfahrenen Menschen [Gal-2020, S. 1f.]. Zudem werden FTS nicht nur für den Transport, sondern auch als mobile Roboter mit Manipulator für Handhabungstätigkeiten eingesetzt [Ull-2019, S. 20ff.]. Die Anwendungsbereiche beschränken sich nicht mehr nur auf den Indoor-Bereich, sondern umfassen nun auch Outdoor-Anwendungen. Dabei kann es sich um Hafenterminals, Flughäfen, Betriebshöfe oder Werksgelände handeln [fml-2020a, S. 7ff.].

Darüber hinaus zeichnet sich bereits eine fünfte Epoche ab. Diese ist vom „Autonomiegedanken“ geprägt, bei dem smarte Robotik und menschliche Kreativität zusammenfließen [Ash-2015] [Sim-2019].

Die äußere Form sowie die Transportaufgabe eines FTF ist variabel. FTF können in lastziehende und lasttragende Transportfahrzeuge eingeteilt werden. Lastziehende FTF sind Schlepper (z. B. Zugmaschinen) oder Unterfahrschlepper. Lasttragende FTF können Plattformen sein, die einen oder mehrere Ladungsträger transportieren oder Lasten aktiv aufnehmen und transportieren, wie beispielsweise Stapler [VDI-2510, S. 8ff.]. Neben der Transportaufgabe lassen sich FTS auch in Indoor- und Outdoor-Fahrzeuge oder in Schwerlast- und Einzellasttransporte unterteilen. Einzelne Beispiele von FTS und deren Ausprägungen sind der nachfolgenden Abbildung 2-1 zu entnehmen.



Abbildung 2-1: *Illustration verschiedener FTS a) [Ull-2019, S. 3] Bildquelle: Barrett-Cravens/Savant Automation, 1958 b) [BMW-2018] Bildquelle: BMW Group, 2018 c) [DB-2020] Bildquelle: DB Schenker, 2020 d) [BMW-2019] Bildquelle: BMW Group, 2019*

Der Einsatz von FTS im Outdoor-Bereich hat sich erst im Laufe der vierten Epoche etabliert. Zunächst in Hafenterminals, da es sich hierbei um abgesperrte Bereiche ohne Fremdverkehr und Personen handelt [Ull-2019, S. 116]. Der mechanische Aufbau sowie die Funktionsweise eines Outdoor-FTF ähnelt in vielen Punkten denen eines Indoor-FTF. In Anlehnung an die VDI Richtlinie 2510 werden die folgenden Funktionseinheiten für Outdoor-FTF nachfolgend näher beleuchtet [VDI-2510, S. 14ff.]:

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Fahrzeugrahmen und Fahrwerk | 5. Datenübertragung |
| 2. Energiespeichersystem | 6. Warn- und Sicherheitseinrichtung |
| 3. Lokalisierung und Navigation | 7. Lastaufnahmemittel |
| 4. Leitsteuerung | 8. Outdoor-Betrieb |

Fahrzeugrahmen und Fahrwerk

Im Indoor-, wie im Outdoor-Betrieb müssen der Fahrzeugrahmen und das Fahrwerk eines FTF in der Lage sein, den statischen und dynamischen Anforderungen des Geländes standzuhalten. Zu diesen zählen nicht nur Eigengewicht, Lenk- und Fahrkräfte sowie transportierte Lasten, sondern auch eingebrachte Schwingungen durch äußere Anregung, z. B. durch Riefen im Boden. Die Anordnung der Räder erfolgt zum einen mit dem Ziel einer optimalen Lastverteilung und zum anderen im Hinblick auf die Kippsicherheit des Fahrzeugs. Neben der Stabilisierung hat das Fahrwerk die Aufgabe, Antriebs-, Brems- und Lenkkräfte in den Untergrund zu leiten. Gerade bei Fahrbahnen mit Steigung und Gefälle oder rutschigem sowie unebenem Boden stellen diese Anforderungen Hürden dar, denen im Regelfall mit der Breite und dem Material der Reifen begegnet wird [fml-2018, S. 12]. So werden beispielsweise für den Indoor-Bereich in der Regel Polyurethanrollen und für den Outdoor-Bereich luftgefüllte Gummireifen mit Profil verwendet [VDI-2510, S. 14ff.].

Energiespeichersystem

Um den Vortrieb zu erzeugen und zusätzliche Aufgaben zu erfüllen, benötigt das FTF eine Energiespeicherquelle. Diese befindet sich entweder als Traktionsbatterie im

Fahrzeug oder alternativ erfolgt die Energieversorgung kontinuierlich durch Induktions- oder Kontaktsysteme, also zusätzliche fest installierte Infrastruktur.

Neben einem elektrischen Antrieb durch Batterien oder den angesprochenen Induktions- oder Kontaktschienen, befinden sich weitere Energiespeicherkonzepte für FTS – wie die Brennstoffzelle – noch im Stadium der Forschung und Entwicklung [VDI-2510, S. 21ff.] [VDI-4451-2] [VDI-4451-2, S. 2ff.] [VDI-4451-2] [fml-2018, S. 12]. Ein Beispiel in diesem Bereich stellt das Forschungsprojekt „FFZ70“ dar. Das Projekt beschäftigte sich mit der Entwicklung, der Erprobung, dem Einsatz und dem wirtschaftlichen Betrieb von 70 wasserstoffbetriebenen FFZ für die Produktionsversorgung im BMW-Werk Leipzig [Wag-2021] [Now-2017]. Ein weiteres Beispiel liefert Toyota Material Handling, die in den USA bereits 500 FFZ mit Brennstoffzellen ausgestattet haben [Hes-2021]. Allerdings handelt es sich hierbei in beiden Fällen um FFZ und keine FTS.

Lokalisierung und Navigation

Die Hauptaufgabe der Fahrzeugsteuerung ist die Lokalisierung und Navigation. Die Lokalisierung bestimmt den Standort und erfasst die Lage des FTF, wohingegen die Navigation die Pfadplanung übernimmt. Dies wird auch als Lageortung und Lagekopplung bezeichnet [Ull-2019, S. 152ff.]. Für die Bewältigung der logistischen Aufgabe des Waren- und Materialtransports muss das FTF seine Position bestimmen und zum vorgegebenen Ziel navigieren können. Demnach lassen sich die Aufgaben wie folgt unterteilen [DIN-13312] [fml-2020a, S. 11f.]:

- Standortermittlung des Fahrzeugs
- Zielermittlung
- Ermittlung der Handlungsschritte

Für diese Kernaufgaben der Lokalisierung und Navigation existieren diverse Lösungen. Die einfachste Umsetzungsmöglichkeit der Navigation ist die bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnte Spurführung mit physischen Leitlinien. Bei diesem Prinzip werden Einrichtungen (z. B. Schienen) für eine direkte mechanische Steuerung der Fahrzeuge am oder im Fußboden zum Navigieren verwendet. Eine weitere Möglichkeit sind Induktionsschleifen. Problematisch bei dieser Form der Spurführung sind ein größerer Aufwand bei Änderungen der Fahrroute sowie im Outdoor-Bereich eine Anfälligkeit gegenüber Witterungseinflüssen, beispielsweise in Form von Schnee, der die Induktionsführung beeinträchtigen kann. Diese Nachteile können behoben werden, indem statt einer durchgehenden Spur Wegpunkte und Marken im Boden oder Umfeld des Fahrwegs angebracht werden. Das FTF fährt so von einem Navigationspunkt zum nächsten, wobei es sich an den einzelnen Punkten neu orientiert (Rasternavigation). Die Wegpunkte sind auf unterschiedlicher Weise realisierbar. Transponder im Boden

sind ebenso denkbar wie Barcodes oder Reflektoren in der Umgebung [VDI-2510, S. 28ff.] [VDI-2510-1, S. 2ff.] [fml-2018, S. 13].

Neben den klassischen induktiven Verfahren existieren auch optische, freinavigierende Verfahren, wie die laserbasierte Navigation. Lasersensoren, wie beispielsweise LiDAR erfassen Entfernungs- und Geschwindigkeitsinformationen. Durch die Erfassung von mindestens drei Punkten, deren Position in der Umgebung bekannt ist, ist es möglich eine genaue Position zu bestimmen. Dieses Vorgehen wird als Triangulation bezeichnet. Hierfür müssen die eingesetzten Sensoren eine hohe Genauigkeit und eine große Reichweite aufweisen. Basierend auf den Daten unterschiedlicher Sensoren kann ein 2D-Raummodell der Umgebung erstellt werden, welches Eingangswerte für die Navigation liefert. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen in der Flexibilität, da natürliche Landmarken wie Gebäudestrukturen genutzt werden. Eingriffe in die Infrastruktur müssen nur vorgenommen werden, wenn die vorhandenen Strukturen nicht ausreichende Merkmale für die Erstellung einer virtuellen Karte (2D-Raummodell) bieten oder wenn die Karte manuell ergänzt werden muss, z. B. durch verbotene Zonen oder Sicherheitsbereiche. Diese Problematik kann durch die Anbringung von Reflektoren in der Umgebung beseitigt werden [Mau-2018, S. 20] [Ull-2019, S. 42f.].

Virtuelle Karten unterstützen die räumliche Wahrnehmung des Roboters [Nüc-2006, S. 27f.]. Um diese Karte erzeugen zu können, wird häufig die Softwarelösung Simultaneous Localisation and Mapping (SLAM) eingesetzt. Das Ziel von SLAM besteht darin, den Standort des Fahrzeugs abzuschätzen, während die Karte inkrementell aufgebaut wird. Um die Fahrzeugpose und die Karte der Umgebung abzuschätzen, werden Steuereingänge verwendet, die die Bewegung zwischen dem Zeitpunkt $t - 1$ und t darstellen. Diese Steuereingänge helfen beim Aufbau und der Verbesserung der Karte sowie der Abschätzung der Fahrzeugposition. In kleinen Intervallen werden stets neue Messungen durchgeführt, die Daten zur Umgebung liefern. Durch die Überlappungen mit alten Messdaten kann die Karte kontinuierlich erweitert werden [Bre-2017, S. 1f.] [fml-2020a, S. 12f.].

Visuelle Sensoren, wie Kameras, gehören ebenfalls zur Gruppe der optischen Verfahren. Kameras erzeugen zunächst 2D-Daten, welche mit zwei unterschiedlichen Methoden ausgewertet und durch Tiefeninformationen ergänzt werden können. Tiefeninformationen erweitern ein 2D-Bild durch 3D-Informationen.

Zum einen kann die Entfernung zu Objekten durch Triangulation (Stereovision) und zum anderen mithilfe der Signallaufzeit (*engl. Time-of-Flight, ToF*) ermittelt werden. Bei der Triangulation werden Aufnahmen zweier Kameras aus unterschiedlichen Blickrichtungen ausgewertet und aus der Differenz der Winkelunterschiede die Entfernung

ermittelt. Dieses Vorgehen ahmt die Strukturen des menschlichen Sehens nach, es analysiert und verarbeitet die gewonnenen Bildinformationen und ermittelt die Zielinformationen [Xu-2020, S. 308]. Bei der ToF-Methode hingegen wird die Zeit gemessen, die nach dem aktiven Aussenden einer Lichtquelle bis zum Eintreffen der Reflektion von Objekten verstreicht. Da die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Licht, solange das Medium das Gleiche bleibt, konstant ist, kann aus der ToF-Methode direkt die Entfernung zum angestrahlten Objekt bestimmt werden. ToF-Kameras senden ein flächendeckendes Signal und alle Messpunkte im Blickfeld werden zeitgleich ermittelt. Aus diesem Grund lassen sich ebenfalls Objekte in Bewegung gut erkennen [Vog-2017, S. 97] [fml-2019b, S. 24f.].

3D-Kameras liefern somit Rot-Grün-Blau-(RGB)-Daten und Tiefeninformationen in einer Ebene, wohingegen ein LiDAR ausschließlich Tiefeninformationen in einer bestimmten Ebene liefern kann [Vog-2017, S. 97].

Des Weiteren kann Ultraschall für die Navigation verwendet werden. Ultraschallsensoren messen Abstandsinformationen mithilfe der Zeitdifferenz zwischen dem Senden einer Schallimpulsfolge und dem Empfangen eines Echos. Somit kann anhand der Laufzeit und unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit die Entfernung umliegender Objekte ermittelt werden. Außerdem weisen Ultraschallsensoren eine gute Hintergrundaussblendung auf, trotz absorbierender oder transparenter Oberflächen kann demnach in der Regel eine zuverlässige Entfernungsmessung durchgeführt werden [Her-2012, S. 40].

Eine unterstützende Funktion zu den vorgestellten Navigationstechnologien leistet die Odometrie, die im Zusammenspiel mit der Koppelnavigation eingesetzt wird. Fahrtrichtungs- sowie Fahrtstrecken- oder Geschwindigkeitsmessungen werden durch eine inertielle Messeinheit (*engl. Inertial Measurement Unit, IMU*), die aus einem Beschleunigungssensor und einem Gyroskop bestehen kann, durchgeführt. Die Odometrie schätzt die Position und Orientierung eines Fahrzeugs über die Bewegung der einzelnen Räder [Her-2012, S. 111]. Deshalb weisen die Messungen Ungenauigkeiten, die aufgrund von Schlupf oder Kurvenfahrt entstehen können, auf. Zudem können sich über die Signalverarbeitung, z. B. numerische Integration, weitere Ungenauigkeiten ergeben. Daher wird die Odometrie häufig in Verbindung mit weiteren Verfahren, wie z. B. LiDAR eingesetzt. [Ull-2019, S. 32ff.] [fml-2020a, S. 12] [fml-2019b, S. 20].

Neben den induktiven und optischen Verfahren wird insbesondere für Outdoor-Anwendungen ein globales Navigationssatellitensystem (*engl. Global Navigation Satellite System, GNSS*), wie beispielsweise das Global Positioning System (GPS), genutzt.

Dieses beruht auf dem Trilateration-Prinzip. Von geostationären Satelliten, deren Position bekannt ist, werden Funksignale ausgesendet, welche von Navigationssystemen, die sich an unterschiedlichen Orten befinden können, empfangen werden. Diese Funksignale enthalten Zeitstempel. Somit kann über die Laufzeit auf die Entfernung zum Satelliten geschlossen werden. Bei drei oder mehreren Satelliten ist dann auch die Position bekannt. Die Genauigkeit des Systems ist stark von den Umgebungsbedingungen abhängig und liegt zwischen 5 m und 20 m [Fen-2020, S. 9f.] [Sch-2018b, S. 52ff.].

Da die Genauigkeit des GPS für die Navigation von FTS nicht immer ausreichend ist, wird das Real Time Kinematic differential GPS (RTK dGPS) eingesetzt. Das RTK dGPS liefert Genauigkeiten unter 2 m [Xu-2020, S. 303]. Bei den Verfahren des RTK dGPS wird eine zusätzliche Referenzstation, deren exakte Position bekannt ist, auf dem Einsatzgebiet installiert. Aus den Abweichungen der Signale der Position eines bekannten Endgeräts zur Referenzstation kann der Fehler der Messung bestimmt werden. Darauf beruhend werden die Signale zur Bestimmung der Position des FTF korrigiert und können mit einer Genauigkeit von bis zu 1 m ermittelt werden. Wird zusätzlich eine Echtzeit-Funkverbindung für die Informationsübermittlung und Korrektur der Position eingesetzt, kann die Genauigkeit auf unter 1 m verbessert werden [Mor-2007, S. 520]. Im Vergleich zu den bisher genannten Navigationstechnologien hat die Satellitennavigation vor allem für den Outdoor-Bereich die Vorteile eines großen Signalerkennungsbereichs und einer vollständigen Informationserfassung [Xu-2020, S. 308] [fml-2020a, S. 13].

Um die Verlässlichkeit und Genauigkeit der Lokalisierung und Navigation zu erhöhen, werden nicht einzelne Navigationstechnologien verwendet, sondern mehrere Technologien miteinander fusioniert. So werden bei Defekten eines einzelnen Sensors Verluste kompensiert. Die erfassten Informationen können kombiniert werden, um eine genauere Navigationsentscheidung zu treffen. Aus dieser Datenfusion kann die Komplementarität von verschiedenen Sensordaten verbessert werden und dem FTF ist es möglich, sich an unterschiedliche Umgebungen anzupassen [Kho-2012, S. 1444ff.] [Xu-2020, S. 308] [fml-2020a, S. 13f.]. Abbildung 2-2 zeigt eine Einordnung der soeben beschriebenen Navigationstechnologien in induktive und optische Verfahren sowie aktive Sender [fml-2019b, S. 20].

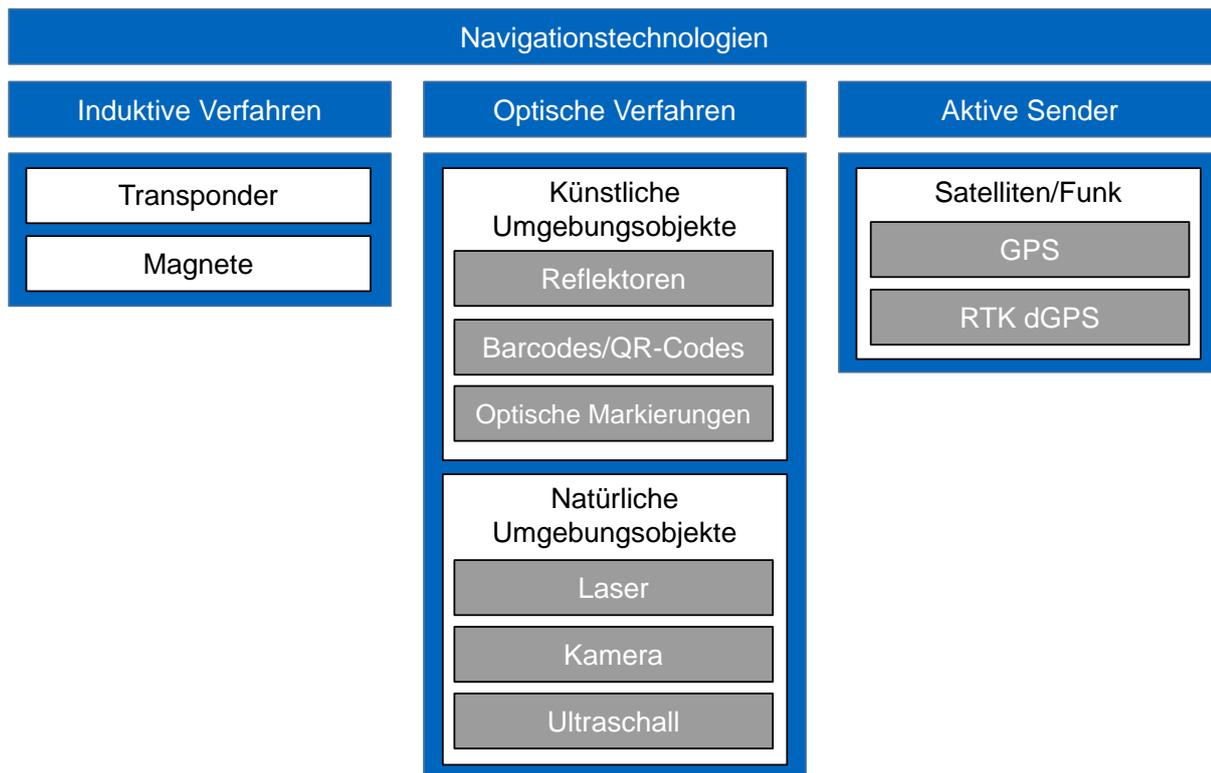


Abbildung 2-2: Einordnung von Navigationstechnologien für FTF

Leitsteuerung

Die FTF-Leitsteuerung ist ein Computersystem mit Hard- und Softwarekomponenten, welches die Koordination einzelner oder mehrerer FTF übernimmt und sie in die innerbetrieblichen Abläufe integriert [VDI-4451-7, S. 3ff.]. Der Aufbau einer FTF-Leitsteuerung setzt sich aus den folgenden drei Komponenten zusammen:

- Benutzer-Interface
- Transportauftragsabwicklung
- Servicefunktionen

Das Benutzer-Interface besteht aus der Mensch-Maschine-Schnittstelle für die Interaktion mit dem Benutzer und Maschine-Maschine-Schnittstellen für den Transfer der Daten. Das Ziel der Transportauftragsabwicklung ist es, Aufträge schnellstmöglich mit der niedrigsten erforderlichen Anzahl an Fahrzeugen zu erledigen. Die Transportauftragsabwicklung besteht aus den folgenden Teilschritten [VDI-4451-7, S. 3ff.]:

- Die Transportauftragsverwaltung, in der die Transportaufträge auf ihre Ausführbarkeit getestet werden
- Die Fahrzeugdisposition ermittelt für den freigegebenen Transportauftrag das günstigste FTF. Sie plant außerdem den Umgang mit Leerfahrten und die Batterieladestrategien

- Die Fahrauftragsabwicklung sorgt für die reibungslose Lastaufnahme und Lastabgabe, sowie den störungsfreien Transport
- Die Servicefunktionen der FTF-Leitsteuerung unterstützen den Anwender während des Betriebs

Die Aufgaben der Leitsteuerung lassen sich in die Auftragsvergabe, die Routenplanung und die Konfliktlösung untergliedern. Die Aufträge erhält die Leitsteuerung von einer übergeordneten Materialflussteuerung. Bei der Vergabe der Aufträge wählt die Leitsteuerung das passende FTF aus, welches den Auftrag ausführen soll. Es verteilt und priorisiert Aufträge an die FTS. Die Verteilung kann beispielsweise über das Auktionsprinzip realisiert werden. In diesem Fall sind die FTS die Bieter. Sie senden Angebote an die Stationen, die Verkäufer darstellen. Das Leitsystem entscheidet aufgrund der Daten, welches FTF den Zuschlag für das Transportvorhaben erhält. Die Priorisierung von Aufträgen kann z. B. auf Basis der Verfügbarkeit, des Batteriestands oder der Distanz zum Auftragsort von der Leitsteuerung vorgenommen werden. Sobald ein Zuschlag erteilt wurde, wird die zu wählende Route geplant. Die Routenplanung und Auftragsvergabe hängen voneinander ab, da die Berechnung des Angebots auf der Routenplanung basiert. Das dritte Aufgabengebiet der Konfliktlösung beschäftigt sich mit dem Zurücksetzen der Komponente bei einem Ausfall sowie dem Umgang mit Verkehrs- und Ressourcenkonflikten [Sch-2013, S. 1ff.].

Um die Systemschnittstellen zwischen der Leitsteuerung und mehreren FTS zu vereinheitlichen, arbeitet der Verband der Automobilindustrie (VDA) derzeit an einem Daten- und Schnittstellenstandard. Die VDA 5050 ermöglicht eine standardisierte Kommunikation zwischen den FTS und der Leitsteuerung. Somit können die Flexibilität des Systems sowie die Herstellerunabhängigkeit gesteigert werden. Durch die „Plug&Play“-Funktion verringert sich die Implementierungszeit und eine Komplexitätsreduktion ist möglich [VDA-5050].

Datenübertragung

Der Betrieb eines FTF erfordert die Kommunikation der einzelnen Systemkomponenten miteinander. Somit müssen zwischen der Leitsteuerung, den Fahrzeugen, Lastübergabestationen und anderen Systemen, die mit dem FTF interagieren, Daten ausgetauscht werden, um eine Zusammenarbeit zu ermöglichen. Die Datenübertragung entwickelt sich aktuell von einer kabelgebundenen zu einer kabellosen Kommunikation. Hierfür müssen die Kommunikationssysteme an die neuen Anforderungen des industriellen Umfelds angepasst werden [Die-2017, S. 1].

Als physikalische Übertragungsprinzipien wird der Datenaustausch mit Induktion, durch elektromagnetische Wellen realisiert [VDI-2510, S. 36]. Heutzutage werden Daten überwiegend mit Wireless Local Area Network (WLAN) [Ull-2019, S. 11] und Long Term Evolution (LTE) [Bre-2019, S. 524], das die vierte Generation (4G) des Mobilfunks ist, übertragen. Jedoch kann es je nach Anwendungsfall zu Einsatzverboten der WLAN-Technologie kommen, dann wird auf Schmalbandfunk, wie beispielsweise Bluetooth oder Zigbee, ausgewichen. Für stationär verbaute Systemkomponenten wird häufig eine Local Area Network (LAN)-Verbindung zur Leitsteuerung gewählt [Ull-2019, S. 112].

Neben der bereits gängigen Datenübertragung mit LTE, kommt nun auch vermehrt 5G in der Industrie zum Einsatz. Durch die Vernetzung der Fahrzeuge in einem Gesamtsystem können erhebliche Potenziale erschlossen werden. 5G und LTE Advanced, welches auch als 4G+ bekannt ist, bieten erstmals die Möglichkeit, das Mobilfunknetzwerk für die industrielle Anwendung zu nutzen. Mit der steigenden Anzahl an Sensoren und elektronischen Komponenten im FTF und anderen peripheren Systemen steigen auch die zu übertragenden Datenmengen. 5G bietet hierbei die Grundlage für die Vernetzung der einzelnen Systemkomponenten und den Datenaustausch [Dau-2018, S. 20]. Insbesondere für den Outdoor-Bereich bietet die 5G-Technologie Vorteile, da für viele andere Übertragungstechnologien, wie beispielsweise WLAN, noch keine ausreichende Netzabdeckung realisiert werden konnte [Lyc-2019, S. 1] [fml-2020a, S. 14f.].

Warn- und Sicherheitseinrichtung

Die Warn- und Sicherheitseinrichtungen gewährleisten einen sicheren Betrieb des FTF. Eine Unterscheidung ist zu treffen, weil Warneinrichtungen keinen Einfluss auf das Fahrzeug selbst nehmen, sondern ausschließlich optisch oder akustisch auf die Anwesenheit des Fahrzeugs hinweisen. Zu den optischen Warneinrichtungen zählen unter anderem Reflektorbänder, Beleuchtung und Statusanzeigen am FTF. Akustische Signale ertönen vor allem vor Beginn der Fahrt, beim Rückwärtsfahren und an Kreuzungen sowie beim Eintreten in das Warnfeld des FTF [VDI-2510b, S. 19].

Taktile Sensoren, wie Bumper und Sensoren zur Personen- und Objekterkennung, melden der Steuerung des Fahrzeugs, wenn es Gefahr läuft auf ein Hindernis zu treffen oder bereits eines berührt. Als Maßnahme daraus erfolgt eine Geschwindigkeitsreduzierung, Stoppen oder Ausweichen des Fahrzeugs. Ferner verfügen alle FTS über Not-Aus-Knöpfe, die ein schnelles und einfaches Stoppen des Fahrzeugs ermöglichen [VDI-2510, S. 18ff.] [VDI-4451-6, S. 18ff.] [fml-2018, S. 14].

In der Praxis werden für den Personen- und Maschinenschutz Kombinationen von berührenden (taktile) und berührungslosen Sensoren genutzt. Dabei kann es sich – analog zur Navigation – um visuelle Sensoren, Ultraschallsensoren, Infrarotsensoren oder Kontaktsensoren handeln [VDI-4451-6, S. 18ff.]. Infrarotsensoren werden eingesetzt, um bei einer Annäherung an Hindernisse Kollisionen zu vermeiden. Kontaktsensoren werden häufig zur automatischen Planung der Hindernisumgehung verwendet [Lop-2002, S. 1ff.]. Einige LiDAR Sensoren, wie beispielsweise der „*outdoorscan3*“ der SICK AG, können sowohl für die Navigation als auch für den Personen- und Maschinenschutz verwendet werden. Die Besonderheit dieses Lasersensors ist die Zertifizierung nach ISO13849¹ und EN62061² für den Personenschutz im Indoor- und Outdoor-Bereich. Nach der ISO13849 erreicht der „*outdoorscan3*“ ein Performance Level (PL) „d“. Das PL beschreibt die Fähigkeit von sicherheitsbezogenen Teilen (z. B. eines Lasersensors) eine Sicherheitsfunktion unter vorhersehbaren Bedingungen auszuführen, um die erwartete Risikominderung zu erfüllen [ISO-13849-1]. Letztendlich dient das PL der Überprüfung des erforderlichen Sicherheitsniveaus. Die EN 62061 regelt die Bewertung von Risiken anhand eines Risikographen in Form einer Tabelle und beinhaltet die Validierung von Sicherheitsfunktionen. Die Risikoabschätzung wird mithilfe des Safety Integrity Level (SIL) vorgenommen [DIN-62061]. Ein weiteres Beispiel eines personenschutz-zertifizierten Sensors bietet die 3D-basierte ToF-Kamera „*tofguard*“ des österreichischen Start-ups tofmotion GmbH. Sie erreicht ebenfalls ein PLd und ein SIL2, ist für den Outdoor-Bereich geeignet und wurde im September 2020 als erste Kamera personenschutz-zertifiziert [tof-2020] [Jun-2020].

Einzelne Sensoren, welche diese Zertifizierungen nicht vorweisen, können über eine Fusion mehrerer Sensoren und einer anschließenden Risikoanalyse nach der ISO13849 und EN62061 als Gesamtsystem zertifiziert und somit personensicher für den Indoor- und Outdoor-Bereich gestaltet werden.

Lastaufnahmemittel

Das Lastaufnahmemittel eines FTF dient zur Aufnahme und Abgabe der Last und kann auf verschiedene Arten realisiert werden. Zum einen kann dies aktiv, beispielsweise mit Gabelzinken, Kettenförderern oder durch das Unterfahren des FTF geschehen oder passiv mit einem manuell betriebenen Stapler umgesetzt werden. Denkbar sind auch Manipulatoren, wie etwa Greifarme, die auf dem FTF oder dem mobilen Roboter angebracht sind. Sie ermöglichen neben der logistischen Aufgabe des Gütertransports zudem das Handhaben von Gütern [Sie-2011, S. 1] [fml-2018, S. 14f.].

¹ Die ISO13849 gehört zum Bereich der Sicherheit von Maschinen und beschäftigt sich mit Gestaltungsleitsätzen zu sicherheitsbezogenen Teilen von Steuerungen [ISO-13849-1].

² Die EN62061 befasst sich mit der Bewertung von Risiken mithilfe einer Risikotabelle [DIN-62061].

Outdoor-Betrieb

Die im Outdoor-Bereich herrschenden Umgebungsbedingungen stellen höhere Anforderungen an die einzelnen Systemkomponenten als im Indoor-Bereich dar. Insbesondere sind hierbei Aspekte der Sicherheit und Navigation hervorzuheben. Um Kollisionen mit Personen und Maschinen im Indoor- wie im Outdoor-Bereich zu vermeiden, ist in der Steuerungsarchitektur des FTF eine Sicherheitsschicht integriert [Tob-2012, S. 64]. Die eingesetzte Sensorik ermöglicht es, Hindernisse auf der Fahrbahn frühzeitig zu erkennen. Im Outdoor-Bereich herrscht hingegen ein in der Regel erhöhter Verkehrsbetrieb aus FTS, FFZ, LKW, PKW, Fahrradfahrern und Fußgängern, die auch werksfremde Personen sein können. Insbesondere bei sich bewegenden (dynamischen) Hindernissen ist es schwierig abzusehen, ob das Hindernis die geplante Fahrbahn kreuzen wird oder nicht [Tob-2012, S. 64].

Auch die höheren Geschwindigkeiten aller Verkehrsteilnehmer auf dem Werksgelände im Vergleich zum Indoor-Bereich stellen eine weitere Herausforderung dar. Grundsätzlich gelten die gleichen Sicherheitsanforderungen wie im Indoor-Bereich: Kollisionen mit statischen und dynamischen Hindernissen müssen vermieden werden. Jedoch haben die höheren Geschwindigkeiten längere Bremswege zur Folge, weshalb ein größerer Bereich für die Hinderniserfassung erforderlich ist [Tob-2012, S. 62]. Kommt es zu einer Kollision, prallen die Fahrzeuge nicht nur mit höheren Geschwindigkeiten aufeinander, sondern auch mit einem höheren Gewicht, da Outdoor-FTS in der Regel schwerer sind als Indoor-FTS, was mitunter an den Antrieben oder Aufbauten für die Lastabdeckung liegen kann. Trotz der höheren Geschwindigkeit können FTS für andere Verkehrsteilnehmer auf dem Werksgelände ein Hindernis darstellen, die dieses unter Umständen in riskanten Überholmanövern überwinden.

Des Weiteren birgt die Bodenbeschaffenheit Risiken, da durch beispielsweise Regen, Glätte, Schnee und Schmutz der Reibungskoeffizient des Bodenbelags verändert wird und sich der Bremsweg des FTF verlängert. Aber auch Unebenheiten, die durch Schlaglöcher, Abflussdeckel oder andere in den Boden eingelassene Konstruktionen entstehen, stellen erweiterte Anforderungen an die Räder, Radlager und das Fahrwerk. Während im Indoor-Bereich vor allem Böden verwendet werden, die Richtwerte bezüglich der Druckfestigkeit, Reibung, Sauberkeit, Steigungen und Gefälle erfüllen, werden im Outdoor-Bereich unterschiedliche Materialien (z. B. Beton oder Asphalt) verwendet. Insbesondere bei Asphalt können sich bei einer immer gleichbleibenden Fahrstrecke und erhöhten Temperaturen Riefen im Boden bilden.

Wird außerhalb der Hallen auf dem Werksgelände mit einem optischen Verfahren, wie z. B. LiDAR navigiert, so sind nicht immer natürliche Strukturen, wie Gebäudemauern

vorhanden an denen sich die Sensoren orientieren können. Die Distanz zwischen Laser und Gebäude ist zu groß, das FTF kann sich im Raum „verlieren“³ und ist nicht mehr in der Lage, weiterzufahren [Ull-2019, S. 202ff.]. Weiterhin können Regen, Nebel und Schnee als Hindernisse erkannt werden und einen fehlerhaften Betrieb des FTF verursachen [Tob-2012, S. 70]. Sensorausfälle, die durch Umwelteinflüsse hervorgerufen werden, können durch die zuvor genannte Fusion verschiedener Sensorinformationen kompensiert werden.

Für den Outdoor-Betrieb wird aktuell vermehrt RTK dGPS eingesetzt. Diese präzise Satellitennavigation ermöglicht eine genaue Lokalisierung und demnach auch Navigation [Dia-2013, S. 4]. Neben erhöhten Anforderungen an die Navigation wird im Outdoor-Bereich auch die Fähigkeit mit anderen Verkehrsteilnehmern zu interagieren komplexer. Da etablierte Datenübertragungstechnologien aus dem Indoor-Bereich nicht ohne Weiteres auf den Outdoor-Bereich übertragen werden können, wird im Outdoor-Bereich vermehrt die Mobilfunkübertragung eingesetzt.

Außerdem muss die Batteriekapazität auf die durchschnittlich längeren Fahrstrecken sowie für einen großen Temperaturbereich und entsprechende Schwankungen ausgelegt werden. Ein beheizter Batterietrog wirkt externen Einflüssen, wie Kälte entgegen. Ein Kühlsystem verringert im Sommer bei hohen Temperaturen eine Überhitzung. Jedoch ist zu beachten, dass diese Funktionalität auch bei abgeschaltetem System in Ruhephasen funktionieren muss. Darüber hinaus bewegen sich die Systeme nicht nur auf dem Werksgelände, sondern auch in den Produktionshallen, dies führt im Winter zu enormen Temperaturgradienten. Somit kann im Gesamtblick gezeigt werden, dass aufgrund der veränderten Bedingungen im Outdoor-Bereich alle Fahrzeugkomponenten insbesondere Steuerungs- und Sensorsysteme erheblichen Belastungen ausgesetzt sind [Ull-2019, S. 202ff.].

Zusätzlich ist der Einsatz von Outdoor-FTS von organisatorischen Herausforderungen geprägt. Während im Indoor-Bereich bereits eine Vielzahl von FTS im Serienbetrieb eingesetzt werden, besteht im Outdoor-Bereich noch Forschungsbedarf [fml-2020a, S. 18]. Die wenigen umgesetzten Anwendungen, wie z. B. der *TractEasy* der Firma EasyMile SAS⁴ [Eas-2020b] oder der *AutoTrailer* der Firma Stäubli WFT GmbH liefern erste Erfahrungen im Umgang mit AMRs bzw. FTS im Outdoor-Bereich. Um aber in diesem Bereich Expertenwissen aufzubauen, müssen die mobilen Roboter in breiter aufgestellten Anwendungsfällen betrieben und getestet werden.

³ Das FTF verliert seine Positionsdaten und kann somit nicht mehr navigieren.

⁴ Nachfolgend „EasyMile“ genannt.

2.1.3 Eigenschaften von selbstfahrenden Kraftfahrzeugen

Selbstfahrende Kraftfahrzeuge – auch bekannt unter dem Namen autonome Fahrzeuge – werden bereits seit Mitte der 1980er Jahren von Universitäten, Forschungszentren, Automobilherstellern und Unternehmen weiterer Branchen weltweit untersucht und entwickelt [Bad-2021, S. 2]. Nach der Union of Concerned Scientists sind selbstfahrende Kraftfahrzeuge PKW oder LKW, bei denen kein menschlicher Fahrer mehr die Kontrolle über das Fahrzeug übernehmen muss [Uni-2018]. Mithilfe von Sensoren und Software kombinieren selbstfahrende Kraftfahrzeuge diverse Sensorinformationen und treffen dann Entscheidungen. Der Aufbau eines autonomen Fahrzeugs lässt sich in die zwei Bereiche Fahrzeughardware und Softwarearchitektur unterteilen.

Fahrzeughardware

Die Basis autonomer Fahrzeuge ist das Fahrzeug an sich. Die Fahrzeuge werden zusätzlich mit einem Automatisierungs-Kit ausgestattet. Es werden spezifische Schnittstellen integriert, die für eine direkte, elektronische Ansteuerung von Gas, Bremsen, Gangschaltung und Lenkung sorgen. Die Fahrzeugdaten werden über Controller Area Network (CAN)-Bus-Schnittstellen an beispielsweise Linux-basierte Computersysteme übermittelt. Die gesamte Sensorik, die aus LiDAR, Radar, Kamera, GPS und IMU bestehen kann, ist auf dem Dach sowie am gesamten Fahrzeug angebracht. Die Computer sind in der Regel in den Kofferräumen der Fahrzeuge montiert [Thr-2010, S. 99ff.].

Softwarearchitektur

Einen wesentlich bedeutenderen Teil autonomer Fahrzeuge macht die Softwarearchitektur aus. Diese lässt sich in das Wahrnehmungs- und Entscheidungssystem unterteilen [Pad-2016, S. 34ff.]. Das Wahrnehmungssystem besteht aus vielen Subsystemen, die für Aufgaben wie Fahrzeuglokalisierung, Kartierung statischer Hindernisse, Straßenkartierung, Erkennung und Verfolgung sich bewegender/dynamischer Hindernisse, Verkehrserkennung und Signaldetektion verantwortlich sind. Das Entscheidungssystem ist ebenfalls in viele Subsysteme unterteilt, die für Aufgaben wie Routenplanung, Wegplanung, Verhaltensauswahl, Bewegungsplanung, Hindernisvermeidung und -kontrolle zuständig sind [Pad-2016, S. 34] [Bad-2021, S. 3ff.].

Damit das Fahrzeug überhaupt etwas wahrnehmen kann, ist zunächst eine Datenvorverarbeitung und Fusion der Sensordaten erforderlich. In jedem autonomen Fahrzeug existiert ein Fusionsalgorithmus, der unter anderem die Abschätzung der Fahrzeugposition, auch als „Pose“ bezeichnet, übernimmt. Die Pose umfasst immer Koordinaten und Orientierung (Längs-, Quer-, Vertikalachse) des Fahrzeugs und teilweise auch dessen Geschwindigkeit. Um die Pose bestimmen zu können, werden vor allem GPS oder RTK dGPS sowie Odometrie und IMU verwendet [Thr-2006, S. 34ff.].

Eine weitere Vorverarbeitung findet für die Umweltsensordaten, wie beispielsweise Laser-, Radar- und Kameradaten, statt. Mithilfe dieser Sensorik können hochauflösende 3D-Punktwolken erzeugt und somit Hindernisse und Objekte erkannt werden. Der eigentliche Test auf das Vorhandensein eines Hindernisses oder Objekts ist aufgrund des Rauschens bei Sensormessungen ein probabilistischer Test. Probabilistische Tests und Techniken dominieren seit den 1990er-Jahren den Bereich der roboterassistierten Lokalisierung. Im Zuge dessen wurde SLAM eingeführt. Der SLAM Algorithmus berechnet die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins eines Hindernisses oder Objekts unter Berücksichtigung potenzieller Pose-Messfehler [Bai-2006, S. 109]. SLAM ermöglicht somit das Erkennen temporärer Hindernisse und Objekte sowie das Unterscheiden dieser Hindernisse zu Infrastrukturelementen (z. B. Säulen). Demzufolge unterstützt SLAM die autonome Navigation des Fahrzeugs [Thr-2010, S. 101] [Pad-2016, S. 35ff.] [fml-2020d, S. 17ff.].

Die Erkennung und Verfolgung sich bewegender, dynamischer Hindernisse oder Objekte, wie z. B. Autos, spielt eine wichtige Rolle im Wahrnehmungssystem des autonomen Fahrzeugs. Das Schlüsselement bei der Erkennung dynamischer Objekte ist die zeitliche Differenzierung. Wenn zwei nachfolgende Laserscans einen Bereich in einem Scan als frei markieren und in einem anderen Bereich als besetzt, so stellt diese gemeinsame Beobachtung einen potenziellen „Zeugen“ eines dynamischen Objekts dar. Die Menge dieser Zeugen wird dann gefiltert und dynamische Objekte werden mithilfe von Partikelfiltern (Hypothesen der prädierten Zustände) weiterverfolgt [Thr-2010, S. 102]. Das Tracking von dynamischen Objekten, wie Autos und Personen kann laser- oder kamerabasiert sein [Lüt-2017].

Ist das Fahrzeug in der Lage, seine Umgebung wahrzunehmen und sich selbst in dieser Umgebung zu lokalisieren, sorgt anschließend das Entscheidungssystem für die Routen- und Wegplanung. Zunächst muss eine Auswahl der Route im Straßennetz getroffen werden, die die gewünschte Zielposition mit der aktuellen Position verbindet. Dieser Schritt ähnelt der Suche nach einer Route mit einem Navigationssystem bei der Autofahrt. Bei der Routenplanung stellt das mit SLAM ermittelte Straßennetz einen gewichteten gerichteten Graphen⁵ mit Randgewichten dar, die den Kosten für die Fahrt eines Straßenabschnittes entsprechen. Danach wird mit einer geeigneten Methode ein Pfad mit minimalen Kosten zwischen zwei Punkten (Quelle und Senke) gesucht. Die Komplexität dieses Planungsschritts hängt jedoch von der Komplexität des Straßennetzes ab. Kleinere Netze, wie etwa auf abgesperrten Bereichen, z. B. Betriebs- oder Werksgeländen, können mit klassischen A*- oder Dijkstra-Algorithmen ge-

⁵ Bei einem gewichteten gerichteten Graph sind die Systemvariablen Knoten und funktionale Verbindungen zwischen Knotenpaaren Kanten [Kne-2021, S. 253].

löst werden. Für größere Graphen (Straßennetze), wie z. B. Städte, sind diese Algorithmen nicht optimal. Hier wurde eine Familie von Algorithmen entwickelt, die in der Lage ist, nach einem einmaligen Vorverarbeitungsschritt in Millisekunden eine optimale Route zu definieren [Pad-2016, S. 34ff.] [Bas-2016].

Neben der Routen- und Wegplanung ist eine weitere essenzielle Subfunktion des Entscheidungssystems die Verhaltensebene, die unter anderem die Einschätzung und Interpretation der Verkehrsregeln und der Verkehrslage beinhaltet. Informationen wie Höchstgeschwindigkeit, Fahrspurbegrenzung, Fahrriichtung und Verkehrsregeln werden in der Regel in Straßenkarten eingebettet, die anhand geometrischer und topologischer Eigenschaften dargestellt werden. Ein autonomes Fahrzeug kann eine oder mehrere Karten verwenden, wie z. B. Belegungsrastrkarten, Remissionskarten oder Karten mit Orientierungspunkten, auch als „*Landmarks*“ bezeichnet [Bad-2021, S. 3]. Diese Karten können dann in Abschnitte unterteilt werden, welche am Ende die Route des Fahrzeugs festlegen. Die Verhaltensebene sorgt für das geeignete Fahrverhalten an jedem beliebigen Punkt auf Grundlage verschiedener Bedingungen, wie Signalen von Ampeln oder Verkehrszeichen, Verhalten von Verkehrsteilnehmern oder Straßenverhältnissen. Erreicht das autonome Fahrzeug eine Kreuzung mit einer Stoppbedingung, sorgt die Verhaltensebene basierend auf bereits gespeicherten Regeln dafür, dass das Fahrzeug abbremst, anhält, das Verhalten der Teilnehmer an der Kreuzung beobachtet und erst dann weiterfährt, wenn es an der Reihe ist. Ein Ansatz zur Automatisierung dieser Ebene besteht darin, jedes Verhalten als einen Zustand in einer endlichen Zustandsmaschine⁶ zu modellieren, wobei Übergänge den wahrgenommenen Kontext darstellen – wie z. B. der oben beschriebene Fall der Annäherung an eine Kreuzung [Sic-2009, S. 280ff.] [fml-2019a, S. 16ff.].

Allerdings ist das Fahren in der realen Welt komplizierter und nicht immer vorhersehbar. Das Problem der Abschätzung zukünftiger Trajektorien und der Vorhersage der Absichten von Verkehrsteilnehmern spannt einen neuen Bereich auf, der im Rahmen des maschinellen Lernens intensiver untersucht wird. Maschinelles Lernen ist ein leistungsfähiger Satz von Techniken, die sich mit Algorithmen befassen, die von der Struktur des menschlichen Gehirns inspiriert sind und künstliche neuronale Netze genannt werden. Die Grundidee besteht darin, eine Sammlung von Rechenmodellen zu kombinieren, die aus einfachen und nichtlinearen Transformationen bestehen und versuchen, komplizierte Beziehungsoperationen zwischen Informationen mit unterschiedlichen Abstraktionsebenen darzustellen und es Computern zu ermöglichen, während der Beobachtung von Daten zu lernen. Neuronale Netze bestehen hauptsächlich aus

⁶ Eine endliche Zustandsmaschine ist ein mathematisches Modell eines Verhaltens, bestehend aus Zuständen, Zustandsübergängen und Aktionen. Ist die Menge der Zustände, die eine Maschine annehmen kann, endlich, so wird von einer endlichen Zustandsmaschine gesprochen [Hro-2014, S. 49ff.].

einer Menge von Neuronen, die miteinander verbunden sind. Das Hauptziel der neuronalen Netze besteht darin, die verschiedenen Neuronen zu trainieren, um eine komplexe Beziehung zwischen den Eingabe- und Ausgabedaten zu erhalten [Mai-2014, S. 96ff.] [fml-2019c, S. 11ff.].

Die Planung der Bewegung des Fahrzeugs, wie etwa der Fahrspurwechsel oder das Rechtsabbiegen, wird ebenfalls über die Verhaltensebene des Entscheidungssystems eingesteuert. Das gewünschte Verhalten muss in eine Trajektorie bzw. in einen Pfad übersetzt werden. Dieser Pfad muss für das Fahrzeug dynamisch realisierbar sein und Kollisionen mit Hindernissen vermeiden. Die Aufgabe, einen solchen Pfad zu finden, übernimmt das Bewegungsplanungssystem [Pad-2016, S. 35]. Außerdem erhält das Bewegungsplanungssystem Informationen der Sensoren über statische und dynamische Hindernisse um das Fahrzeug herum und erzeugt eine kollisionsfreie Fahrbahn. Diese entspricht den dynamischen und kinematischen Einschränkungen der Fahrzeugbewegungen. Neben der Planung des Pfads sorgt das Bewegungsplanungssystem für die Ansteuerung der Aktoren. Signale werden vom Bewegungsplanungssystem an die lokale Rückkopplungssteuerungsebene weitergeleitet. Daraufhin erzeugen die Rückkopplungsregler ein Eingangssignal, um das Fahrzeug so zu regulieren und zu steuern, dass es dem vorgegebenen Pfad folgt [Pad-2016, S. 37] [Jo-2014] [Bet-2019]

Grundsätzlich sind Parallelen zwischen dem autonomen Fahren und AMRs festzustellen, beispielsweise bei den verwendeten Sensoren, der Navigationstechnologie sowie der Beschreibung des Wahrnehmungs- und Entscheidungssystems. Der technische Aufbau ist dem eines AMR nahezu identisch. Bei genauerem Hinsehen fallen jedoch auch einige Unterschiede auf, die bei der Diskussion der verschiedenen Aspekte des autonomen Fahrens deutlich werden. So besitzen autonome Fahrzeuge in der Regel entweder einen Vorderrad-, Allrad oder Hinterradantrieb, wohingegen einige AMRs über einen omnidirektionalen Antrieb verfügen. Dies wirkt sich stark auf das Verhalten des Fahrzeugs sowie die Navigation aus. Des Weiteren spielen Sicherheitsaspekte, wie personenschutzertifizierte Sensorik eine weitaus größere Rolle bei AMRs als beim autonomen Fahren. *Ullrich* hebt unter anderem hervor, dass bei AMRs die meisten Sensoren, sowohl Personensicherheitsscanner als auch Navigationsscanner, in einer 2D-Ebene messen. Beim autonomen Fahren besteht die typische Sensorwahl aus 3D-Sensoren ergänzt mit Ultraschall- und Radar-Sensoren [Ull-2017, S. 2].

2.1.4 Einführung und Begriffsdefinition autonomer mobiler Roboter

Die aktuelle Debatte zum autonomen Fahren hat sich auf weitere Industrien ausge dehnt. So werden klassische Transportroboter im Industrieumfeld nicht mehr als FTF, sondern immer häufiger als AMR oder autonome Transportsysteme bezeichnet und

bewegen sich damit an der Schnittstelle zwischen klassischen Intralogistik-FTF und autonomen Fahrzeugen des Straßenverkehrs [Gha-2019].

Die im Jahr 1974 gegründete Robotic Industries Association, die zur Vereinheitlichung von Kriterien und zur Erstellung von Normen für die Roboterindustrie gegründet wurde, hat ein sogenanntes R15.08-Unterkomitee zur Entwicklung einer Norm für die Robotersicherheit unter dem Namen R15.08 Industrial Mobile Robot Safety formuliert. Diese Norm enthält einen Entscheidungsbaum, welcher die Unterschiede zwischen AMRs und FTS verdeutlichen soll. Abbildung 2-3 zeigt einen Ausschnitt dieser Einordnung auf einer hohen Abstraktionsebene [Ger-2019, S. 16] [fml-2020b, S. 18].



Abbildung 2-3: Grobe Einordnung der Begrifflichkeiten AMR und FTS anhand der Navigationstechnologie [Ger-2019, S. 16]

AMRs und FTS unterscheiden sich demnach insbesondere in der Navigation. Eine geführte Navigation ist ein klassisches Merkmal von FTS, autonome Navigation hingegen von AMRs [Ger-2019]. Was jedoch genau unter dem Begriff „autonom“ verstanden wird, ist nicht weiter aufgeführt.

Grundsätzlich wird Autonomie als der Zustand der Selbstbestimmung bezeichnet, also die Fähigkeit, eine Handlung einer anderen Handlung vorzuziehen und Entscheidungen zu treffen. Sie ist zudem von Unabhängigkeit und Selbstverwaltung gekennzeichnet [Ger-2018, S. 417ff.]. Autonomie kann zu Chaos und Unordnung führen. Daher muss es, ähnlich wie bei Staaten oder Individuen, Gesetze, Vorschriften und Regeln geben, die befolgt werden müssen. *Kant* definiert Autonomie als „Selbstbestimmung im Rahmen eines übergeordneten (Sitten-)Gesetzes“ [Kan-2014]. Im Fall des AMR gibt der Mensch dieses Sitten-Gesetz vor, indem er das Verhalten des Roboters programmiert [Mau-2015, S. 3].

Für *Berman und Edan* sind Roboter dann autonom, wenn sie die folgenden Merkmale besitzen: Anpassungsfähigkeit, Lernfähigkeit, die Fähigkeit mit Unsicherheiten umzugehen sowie Entscheidungsfähigkeit [Ber-2010, S. 5]. Die Anpassungsfähigkeit bezieht sich auf die Fahrrouten. AMRs sind nicht auf feste Fahrrouten beschränkt, sondern in einem vordefinierten Korridor frei beweglich. Das bedeutet, ihre Fahrrouten sind einprogrammiert und können vergleichsmäßig einfach geändert werden [Le-2006, S. 2]. Die Lernfähigkeit und die Fähigkeit mit Unsicherheiten umzugehen, wird durch

intelligente Algorithmen, dynamische Pfadsysteme, drahtlose Kommunikationstechnologien und Model-Matching-Technologien erreicht [Čec-2020, S. 104]. Zudem kann mithilfe verschiedener Sensoren die Umgebung wahrgenommen und auf Veränderungen reagiert werden. AMRs sind in der Lage, Aufgaben mit höherer Komplexität zu lösen, ohne dass jeder einzelne Prozessschritt explizit im Vorfeld erlernt werden muss [Ung-2018, S. 255]. Die Entscheidungsfähigkeit spiegelt sich in der Art und Weise, wie AMRs gesteuert und kontrolliert werden, wider. Werden beispielsweise Aufträge von der Leitsteuerung direkt an ein FTF übermittelt, wie in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, handelt es sich um eine zentrale Steuerung.

Mithilfe einer dezentralen bzw. agentenbasierten Steuerung und Kontrolle können AMRs hingegen Entscheidungen selbst treffen [Le-2006, S. 2f.]. Bei einer dezentralen Steuerung werden die Aufträge durch die Leitsteuerung generiert, die AMRs können sich aber je nach Verfügbarkeit und auf der Grundlage lokaler Informationen selbst organisieren und die Aufträge optimal untereinander verteilen [Flä-2015, S. 378ff.]. Dadurch sind AMRs in der Lage, individuelle Entscheidungen zugunsten der Flexibilität, Robustheit und Skalierbarkeit des Transports zu treffen [Ryc-2020, S. 4].

Die wesentliche Herausforderung einer dezentralen Steuerung besteht in einer gesteigerten Komplexität, da alle Fahrzeuge die Möglichkeit haben, Entscheidungen selbstständig zu treffen [Bor-2019, S. 1]. Dabei muss die Schwelle zwischen zentraler und dezentraler Steuerung nicht immer strikt voneinander getrennt sein. Es ist möglich, Merkmale beider Steuerungsarten in einem einzigen System zu kombinieren, sodass beispielsweise eine zentrale Statusüberwachung (globale Informationen) existieren kann, wobei mehrere Roboter autonom anhand dieser Informationen Entscheidungen treffen [Fot-2021, S. 11f.].

Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen AMRs und FTS

Die Hauptkategorien für den Vergleich lassen sich in die Fortbewegung, die Steuerungstechnik und das Strukturdesign unterteilen. Im Bereich der Fortbewegung macht sich die Verlagerung von innen nach außen in der Fahrwerkskinematik sowie bei den unterschiedlichen Radtypen bemerkbar, beispielsweise eignen sich luftgefüllte Gummireifen mit Profil besser für den Outdoor-Einsatz als etwa Polyurethanrollen. Zudem wird im Outdoor-Bereich mit einer höheren Geschwindigkeit gefahren, daher sind geeignete Bremsen, beispielsweise elektromagnetische Bremsen, empfehlenswert, um eine bessere Leistung als im Innenbereich zu erzielen [Ull-2019, S. 94]. Des Weiteren müssen die Antriebe auf den Outdoor-Betrieb ausgelegt sein und beispielsweise Steigungen und Gefälle überwinden. Hinsichtlich der Energieversorgung unterscheiden sich Outdoor- von Indoor-FTS nicht.

In Bezug auf das Strukturdesign ist in den meisten Fällen eine Lastabdeckung erforderlich, um die Last vor Witterungseinflüssen zu schützen. Außerdem müssen die Sensoren geschützt positioniert werden, um vor externen Einflüssen abzuschirmen [Ull-2019, S. 202ff.]. Als zusätzliche Warn- und Sicherheitseinrichtung muss eine Beleuchtung am Outdoor-FTF angebracht werden, um auch bei Dunkelheit von anderen Verkehrsteilnehmern wahrgenommen werden zu können. Die Lasthandhabung zwischen Indoor- und Outdoor-FTF unterscheidet sich in der Regel nicht. Der Grundrahmen eines Outdoor-FTF ist hingegen robuster und stabiler gestaltet als der eines Indoor-FTF, um unter anderem den Witterungsbedingungen und der Bodenbeschaffenheit standhalten zu können.

Im Bereich der Steuerungstechnik hat der Übergang vom Indoor-FTF zum Indoor-AMR einen großen Einfluss auf die Kommunikation mit externen Systemen, wie z. B. die übergeordnete Leitsteuerung, die Kommunikation mit Bedienern über Mensch-Maschine-Schnittstellen sowie die Kommunikation mit anderen Fahrzeugen/Robotern der Maschine-Maschine-Schnittstelle.

Die Wahrnehmung und Entscheidungsfindung wird sowohl durch den Einsatz im Freien als auch durch die autonome Steuerung beeinflusst [Kos-2017, S. 1f.]. Im Outdoor-Bereich müssen Lokalisierung, Navigation, Objekterkennung und Verkehrserkennung durch hochentwickelte Sensoren, wie z. B. LiDAR sowie 2D- und 3D-Kameras realisiert werden [Ull-2019, S. 202ff.]. Dies erfordert zudem eine erhöhte Rechenleistung und verstärkte Kommunikation mit externen Systemen über drahtlose Technologien [Cla-2019, S. 38]. Auch die Routenplanung, Verhaltensauswahl, Bewegungsplanung und Hindernisvermeidung bedarf erhöhter Rechenleistung, intelligenter Algorithmen und der Kommunikation zu externen Systemen. Die Warn- und Sicherheitseinrichtungen müssen sowohl bei einem Indoor-FTF als auch bei einem Outdoor-AMR den gültigen Sicherheitsanforderungen entsprechen.

Im Bereich des Strukturdesigns können sowohl FTS als auch AMRs über Lasthandhabungssysteme verfügen, wie z. B. Gabelzinken oder Manipulatoren. Der Grundrahmen unterscheidet sich zwischen FTS und AMR in der Regel nicht. Zusammenfassend sind die Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen AMRs und FTS in Abbildung 2-4 veranschaulicht [fml-2020c, S. 27].

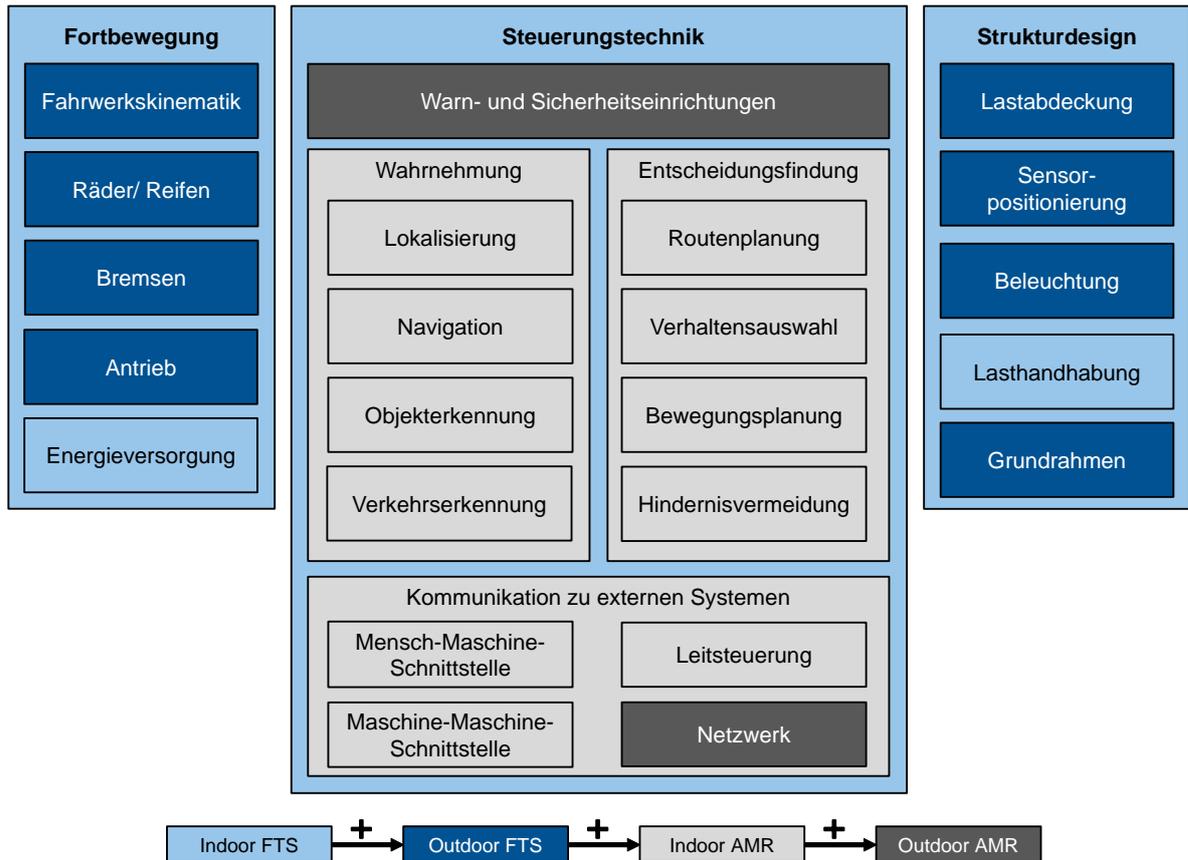


Abbildung 2-4: Differenzierung von AMRs und FTS sowie Indoor- und Outdoor-Anwendungen

Unterschiede und Gemeinsamkeiten zwischen AMRs und selbstfahrenden Kraftfahrzeugen

Wie bereits die Softwarearchitektur (Wahrnehmungs- und Entscheidungssystem) eines Outdoor-AMR aufzeigt, ist die Ähnlichkeit zu selbstfahrenden Kraftfahrzeugen hoch. Die Gemeinsamkeiten beschränken sich nicht nur auf das Fahrzeug, sondern sind auch in dessen Umgebung wiederzufinden. Umwelteinflüsse wie Witterung, Bodenbeschaffenheit, Lichtverhältnisse und Verkehrsaufkommen müssen von einem Outdoor-AMR gleichermaßen bewältigt werden können, wie von einem selbstfahrenden Kraftfahrzeug. Daher werden auch ähnliche bis identische Sensoren bei Outdoor-AMRs eingesetzt [Ull-2019, S. 27]. Ein entscheidender Unterschied liegt jedoch in der Sicherheitsausrüstung und in den Sicherheitsstandards eines Outdoor-AMR. Bei selbstfahrenden Kraftfahrzeugen ist als letzte Instanz immer noch der Fahrer für die Handlungen des Fahrzeugs verantwortlich. AMRs, die auf Werksgelände eingesetzt werden, haben keinen Fahrer und unterliegen somit ausschließlich der Maschinenrichtlinie [Kli-2007] [Inn-2018, S. 47ff.]. Demnach ist der Hersteller des AMR für die Einhaltung der Sicherheits- und Produktdesignvorschriften, wie z. B. der CE-Konformitätserklärung, verantwortlich [Flä-2015, S. 394]. Dies hängt mit einem weiteren wichtigen Unterschied zusammen: der Systemverfügbarkeit. Während selbstfahrende Kraftfahrzeuge im Fall eines Systemausfalls manuell von Menschen gefahren werden

können, benötigen AMRs in einer industriellen Umgebung oft Verfügbarkeiten im Automatikbetrieb von nahezu 100 % und besitzen keine manuelle Rückfallebene [Ull-2017, S. 4].

Ein weiterer Unterschied ist die Geschwindigkeit. Selbstfahrende Kraftfahrzeuge müssen auf öffentlichen Straßen eine deutlich höhere Geschwindigkeit erreichen als AMRs auf dem Werksgelände. Aktuell sind Outdoor-AMRs unter den gegebenen Sicherheitsvorschriften in der Lage, 15 km/h zu fahren [Eas-2020b]. Die geringere Geschwindigkeit führt zu einer verminderten Bedeutung der Aerodynamik bei AMRs. Da AMRs zudem unbemannt sind, ist ihr Sicherheitssystem hauptsächlich darauf ausgerichtet, umstehende Personen nicht zu gefährden oder gar zu verletzen, während das selbstfahrende Kraftfahrzeug zum Schutz seiner Insassen und umstehender Personen gebaut ist [Flä-2015, S. 440ff.].

Darüber hinaus werden AMRs häufig für hochpräzise Aufgaben eingesetzt, wie beispielsweise für das Entladen von Paletten aus einem Auflieger oder für die Positionierung einer Ladung an einer bestimmten Stelle, daher muss ihre Positionierungsgenauigkeit höher sein als bei einem selbstfahrenden Kraftfahrzeug [Ull-2017, S. 4]. Dem einher geht der Bedarf an robusten Antrieben und Rädern, die in der Lage sind, hohe Lasten zu tragen und gleichzeitig das Fahrzeug stabil zu halten. Diese höheren Lasten erfordern eine stabile Kontrolle der Fahrzeugdynamik insbesondere beim Bremsen, um ein Herabfallen der Last vom AMR zu verhindern.

Outdoor-AMRs agieren und rangieren oft in engen Bereichen, wie z. B. LKW Be- und Entladezonen oder bei Andockvorgängen an Toren. Daraus ergibt sich ein Bedarf an erhöhter Manövrierfähigkeit verglichen mit der traditionellen Kraftfahrzeugkinematik, die z. B. mit einem omnidirektionalen Antrieb erreicht werden kann.

Ein weiterer Unterschied zwischen Outdoor-AMRs und selbstfahrenden Kraftfahrzeugen, der mit der Bewegung zusammenhängt, ist die Fahrtrichtung. Während selbstfahrende Kraftfahrzeuge typischerweise eine Vorder- und eine Rückseite haben, sind AMRs häufig so konstruiert, dass sie omnidirektional fahren können. Demnach können sie neben dem vorwärts auch rückwärts oder seitwärts über längere Strecken fahren. Daraus folgt die Notwendigkeit einer redundanten Sensorplatzierung, also müssen anstelle von Front- und Hecksensoren „*Surround-View-Sensoren*“, wie z. B. Kameras, verwendet werden [Ull-2019, S. 202ff.].

Es bleibt festzuhalten, dass Outdoor-AMRs und selbstfahrende Kraftfahrzeuge mehrere Sensortechnologien und Navigationstechniken gemeinsam haben. Die industrielle

Anwendung mit Unterschieden in der Belastung, den Aufgaben und den Sicherheitsanforderungen bei Outdoor-AMRs führt jedoch zu unterschiedlichen Informationsverarbeitungstechnologien und der Notwendigkeit der Einbeziehung sicherheitszertifizierter Ausrüstung [fml-2020c, S. 28ff.].

Klassifizierung des Autonomiebegriffs nach Stufen

Um den Grad bzw. die Stufen eines autonomen Fahrzeugs bestimmen zu können, wurde im Jahr 2014 die Norm J3016 für die Klassifizierung und Definition von Begriffen für straßengebundene Kraftfahrzeuge mit Systemen zum automatisierten Fahren von der Society of Automotive Engineers (SAE) International veröffentlicht. Die Klassifizierung in der Norm beinhaltet sechs Autonomiegrade (0-5) und beschreibt deren Minimalanforderungen [SAE-J3016]. Diese Autonomiegrade können jedoch nicht gleichbedeutend auf intralogistische Systeme im Allgemeinen und AMRs im Speziellen übertragen werden. Die Klassifizierung nach SAE J3016 betrachtet die physische Ebene des Fahrzeugs, nicht aber die übergeordneten Überwachungs-, Steuerungs- und Planungsebenen. Abbildung 2-5 zeigt ein vergleichbares Stufenmodell für intralogistische Systeme von *Fottner et al.* [Fot-2021, S. 4f.].

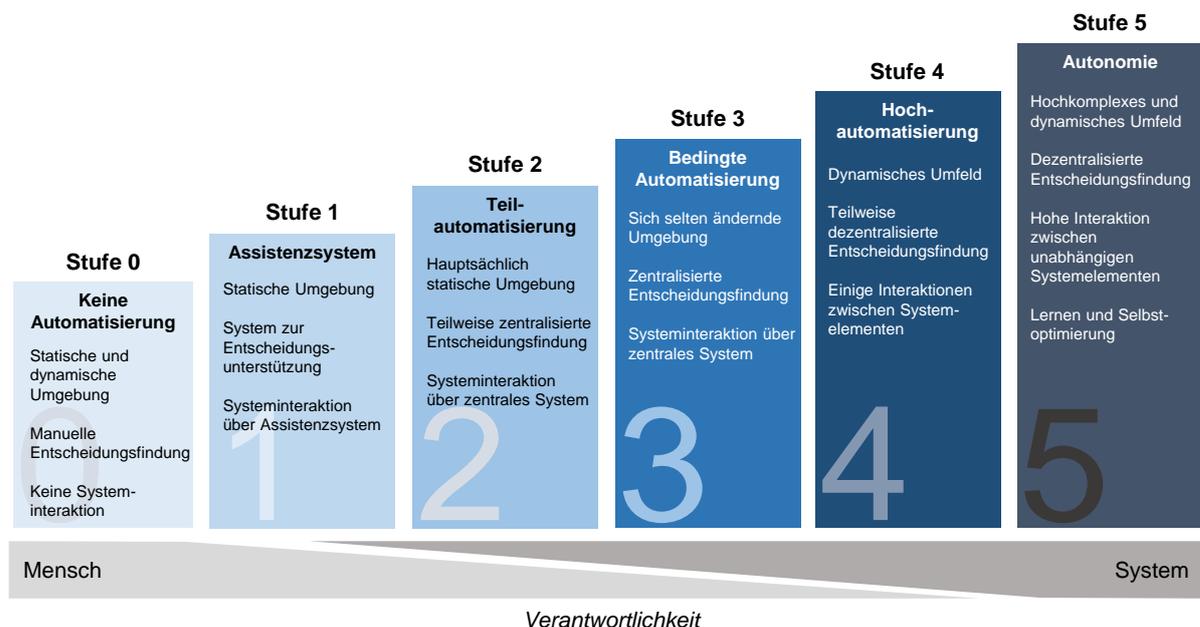


Abbildung 2-5: Abgeleitete Autonomiestufen für intralogistische Systeme [Fot-2021, S. 4f.]

Die fünf Stufen unterscheiden sich anhand von vier Merkmalen: der Umgebung, der Entscheidungsfindung, der Interaktion und der Selbstoptimierung. Sie beruhen auf dem ALFUS-Modell (Autonomy Levels for Unmanned Systems) [Hua-2005] und dem LORA-Modell (Levels of Robot Autonomy) [Bee-2014]. Das erste Merkmal der Stufe 5 (Autonomie) in Abbildung 2-5 bezieht sich auf ein hochkomplexes und dynamisches Umfeld. Autonome Systeme können schnell mit sich verändernden Strukturen in der

Umgebung umgehen. Zudem verfügen sie über eine dezentrale Entscheidungsfindung und eine hohe Interaktion zwischen unabhängigen Systemen. Die Fähigkeit des Lernens und der Selbstoptimierung ist das letzte prägnante Merkmal der Autonomie [Cla-2019, S. 24] [Phi-2007].

Neben diesen vier Merkmalen wird die Gesamtverantwortung vollständig vom System übernommen. Im Vergleich dazu ist die Stufe 0 (Keine Automatisierung) von manueller Entscheidungsfindung und fehlender Systeminteraktion geprägt. Allerdings kann beispielsweise ein manuell betriebenes FFZ sowohl in statischen als auch in dynamischen Umgebungen agieren. Dies lässt sich aus der Anwesenheit eines menschlichen Bedieners ableiten, der die volle Verantwortung übernimmt und sich an dynamische Veränderungen in der Umgebung anpassen kann – einem autonomen System gleich [Fot-2021, S. 4f.].

Klassifizierung nach Aufgabenebenen

Neben den Autonomiestufen spielt eine weitere Dimension eine entscheidende Rolle bei der Klassifizierung intralogistischer Systeme: die Aufgabenebene. Die Automatisierungspyramide nach *Siepmann* liefert eine allgemeine Referenzstruktur für Aufgaben und Funktionen in der industriellen Steuerung und Betriebsführung. Sie ist hierarchisch strukturiert und trennt jeden Aufgabenbereich voneinander [Rot-2016, S. 47ff.]. Bedingt durch die zunehmende Vernetzung findet jedoch ein Paradigmenwechsel statt, der zu einer schrittweisen Auflösung der Automatisierungspyramide führt, wie es in Abbildung 2-6 illustriert ist: Ebenen, die bisher streng getrennt waren, werden in autonomen Systemen mehrfach und über Ebenen hinweg miteinander vernetzt.

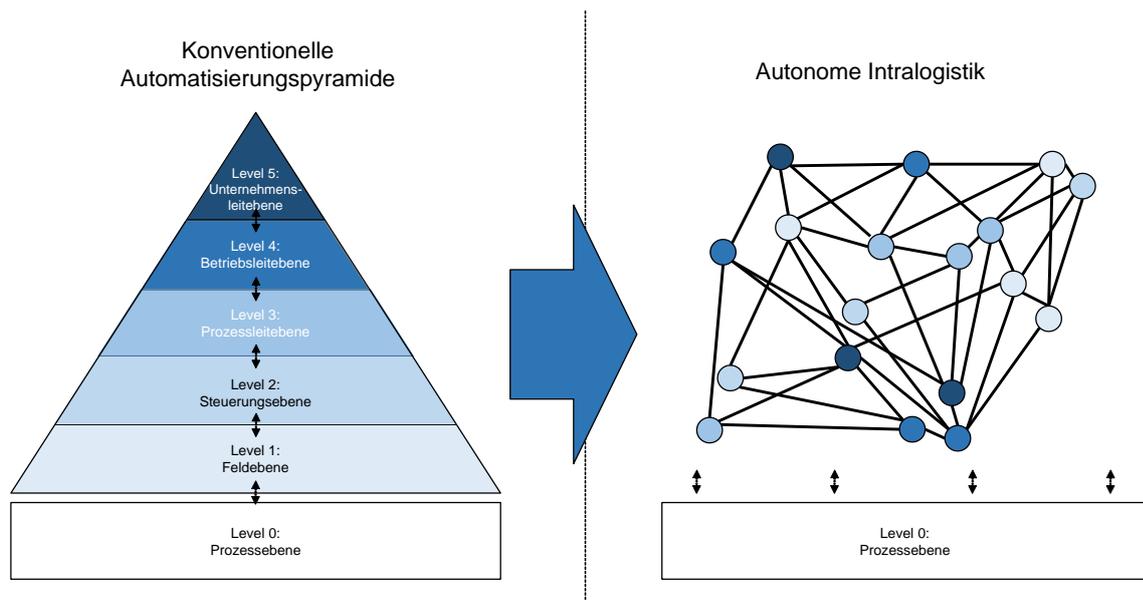


Abbildung 2-6: Auflösung der konventionellen Automatisierungspyramide hin zur autonomen Intra-logistik [Fot-2021, S. 3]

Die unterste Ebene (Level 0) repräsentiert die physischen Produktions- und Logistikprozesse, die in Form von Transport, Lagerung, Kommissionierung, Handhabung und Verpackung erfolgen. Diese Ebene bleibt auch bei der autonomen Intralogistik bestehen. Die nachfolgende Ebene in der Pyramide ist die Feldebene. Sie beinhaltet Sensoren und Aktoren, die in die technischen Systeme eingebettet sind, welche die physischen Prozesse ausführen. Zu den Aufgaben und Funktionen auf Ebene 1 gehören die Erfassung von Sensordaten, die Steuerung der Aktoren und die Eingabe- und Ausgabesteuerung. Es folgt die Steuerungsebene (Level 2), welche die Informationen aus der Feldebene erhält und alle Aktivitäten auf dieser Prozessebene koordiniert. Beispiele für Aufgaben oder Funktionen innerhalb der Prozesssteuerungsebene sind das Objekttrouing oder koordinierende Aufgaben. Die Vorgangsteuerung und kurzfristige Planung, wie z. B. Auftrags- oder Bestandsverwaltung wird von der Prozessleitebene (Level 3) vorgenommen. Die Betriebsleitebene ist verantwortlich für die Produktionsfeinplanung, KPI-Ermittlung sowie das Qualitätsmanagement. Die oberste Ebene (Level 5) konzentriert sich auf langfristige Planungsaktivitäten, wie z. B. Ressourcenplanung [Rot-2016, S. 49ff.] [DIN-62264-1].

Zusammenführung von Autonomiestufen und Aufgabenebenen

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der proklamierte Paradigmenwechsel von einer hierarchischen, zentralen Automatisierungspyramide hin zu einer dezentralen, autonomen Intralogistik bestehende Barrieren zwischen den verschiedenen Hierarchieebenen zunehmend auflöst. Wie Abbildung 2-6 zeigt, kooperieren autonome Einheiten, wie AMRs und Agenten bei der Lösung komplexer Steuerungs- und Planungsaufgaben, welches zu einer lokalen Verschmelzung von Ebenen und Funktionen führt [Gün-2010, S. 250] [Kör-2019]. Mithilfe einer Zusammenführung der Dimensionen Autonomiestufen und Aufgabenebenen lässt sich eine Klassifizierungsmatrix für intralogistische Systeme ableiten, die in Tabelle 2-1 dargestellt ist [Fot-2021, S. 5].

Tabelle 2-1: *Klassifizierungsmatrix intralogistischer Systeme [Fot-2021, S. 5]*

Aufgabenebene	Autonomiestufen					
	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Unternehmensleitebene (Level 5)	Manuelle Entscheidungsfindung bei der Planung des Gesamtsystems	Entscheidungsunterstützungssystem in der Gesamtsystemplanung	Teilweise zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Planung des Gesamtsystems	Zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Planung des Gesamtsystems	Teilweise dezentralisierte Entscheidungsfindung in der Gesamtsystemplanung	Dezentralisierte Entscheidungsfindung in der Gesamtsystemplanung
Betriebsleitebene (Level 4)	Manuelle Entscheidungsfindung in der Gesamtsystemsteuerung	Entscheidungsunterstützungssystem in der Gesamtsystemsteuerung	Teilweise zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Gesamtsystemsteuerung	Zentralisierte Entscheidungsfindung in der Gesamtsystemsteuerung	Teilweise dezentralisierte Entscheidungsfindung bei der Gesamtsystemsteuerung	Dezentralisierte Entscheidungsfindung bei der Gesamtsystemsteuerung
Prozessleitebene (Level 3)	Manuelle Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Entscheidungsunterstützungssystem bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Teilweise zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Teilweise dezentralisierte Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Dezentralisierte Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung
Steuerungsebene (Level 2)	Manuelle Suche und Übermittlung von Informationen auf Anfrage	Unterstützte Suche und Übermittlung von Informationen auf Anfrage	Unterstützte und teilweise in sich geschlossene Informationsbeschaffung und -verarbeitung	Völlig eigenständige Informationserfassung, Informationserzeugung und Interaktion mit dem Zentralsystem	Völlig in sich geschlossene Informationserfassung, Informationserzeugung und teilweise Interaktion mit anderen Systemelementen	Vollständig in sich geschlossene Informationserfassung, Informationserzeugung und Interaktion mit anderen Systemelementen
Prozess-/Feldebene (Level 0/1)	Manuelle Ausführung in statischer Umgebung	Manuell unterstützte Ausführung in statischer Umgebung	Assistierte und teilweise in sich geschlossene Ausführung in statischer Umgebung	Teilweise in sich geschlossene Ausführung in einer sich nur selten ändernden Umgebung	Vollständig in sich geschlossene Ausführung in dynamischer Umgebung	Vollständig in sich geschlossene Ausführung in komplexer und dynamischer Umgebung

Dabei ist zu beachten, dass jede Aufgabenebene eine andere Autonomiestufe erreichen kann. Bei einer Flotte FTS beispielsweise können die einzelnen Fahrzeuge (Level 0/1) zwar frei um Hindernisse herumfahren, erhalten jedoch ihre Transportaufträge von zentral gesteuerten IT-Systemen (Level 2 und 3) [Sch-2018a, S. 225ff.]. Andererseits kann auf der Prozessleitebene (Level 3) eine gewisse Planungsautonomie durch ein Multi-Agenten-System realisiert werden, allerdings führt die Ausführungsebene (Level 0) die generierten Pläne strikt aus.

Schließlich hat die Autorin gemeinsam mit einem Forschungsteam im Rahmen der Veröffentlichung *Fottner et al.* mithilfe der Klassifizierungsmatrix eine Definition für autonome intralogistische Systeme ableiten können, die wie folgt lautet [Fot-2021, S. 3]:

„Autonome Intralogistiksysteme ermöglichen eine in sich geschlossene, dezentrale Planung, Ausführung, Steuerung und Optimierung der innerbetrieblichen Material- und Informationsflüsse durch Kooperation und Interaktion mit anderen Systemen und mit dem Menschen“.

Diese Definition trägt zum Verständnis autonomer mobiler Roboter bei und liefert für den weiteren Verlauf dieser Forschungsarbeit einen wichtigen Beitrag.

2.2 Diskussion bestehender Modelle und Methoden

Für die Auswahl eines geeigneten Vorgehens zur Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände liefert dieser Abschnitt einen Überblick bestehender Ansätze aus Wissenschaft und Praxis. Dabei wird zunächst auf die Grundlagen von Vorgehensmodellen eingegangen. Anschließend folgen ein Überblick sowie eine Diskussion ausgewählter phasenbezogener Vorgehensmodelle. Ein Hauptbestandteil des Vorgehens innerhalb dieser Forschungsarbeit ist die zu verwendende Designmethode. Diese wird für das systematische Ableiten von Anforderungen sowie dem Zuordnen möglicher Lösungsparameter verwendet. Dementsprechend werden in Abschnitt 2.2.3 bestehende Designtheorien und -methoden diskutiert und die in dieser Arbeit angewandte Designmethode ausgewählt. Für die grafische Darstellung der in Kapitel 3 beschriebenen Prozessanalysen werden zuletzt grafische Modellierungssprachen beschrieben und bewertet.

2.2.1 Grundlagen zu Vorgehensmodellen

Ihren Ursprung haben Vorgehensmodelle in der Softwareentwicklung. Zu Beginn der Softwareentwicklung war die Vorgehensweise sehr einfach: Sie setzte sich aus den Schritten „*Schreiben eines Programms*“ und „*Beheben der Fehler im Programm*“ zusammen [Bal-1998, S. 98]. Im Laufe der Jahre hat sich jedoch herausgestellt, dass diese Vorgehensweise zu unstrukturierten Programmen führen kann. Dies war ein Grund für die Weiterentwicklung des Vorgehens zu Vorgehensmodellen. Heutzutage werden Vorgehensmodelle eingesetzt um die Herausforderungen, die neue Entwicklungen mit sich bringen, erfolgreich zu bewältigen. Sie geben einen Rahmen für die geplanten Vorhaben, in dem die Struktur verständlich definiert ist, sodass die einzelnen Aufgaben von den passenden Kompetenzen erarbeitet werden können. Somit schaffen Vorgehensmodelle die Verbindung zwischen den koordinativen Aufgaben des Managements und der technischen Implementierung [fml-2020a, S. 23f.]. *Kneuper et al.* definieren ein Vorgehensmodell als „*ein Muster zur Beschreibung eines Entwicklungsprozesses auf Basis eines Entwicklungsschemas.*“ [Kne-1998, S. 18f.]. Eine weitere Definition liefert *Leimeister*: „*Allgemein beschreibt jedes Vorgehensmodell die Folge aller Aktivitäten, die zur Durchführung eines Projekts erforderlich sind*“ [Lei-2015, S. 266]. Die während der Durchführung angewendete strukturierte Herangehensweise ermöglicht es, die Projekte greifbarer und vergleichbarer zu gestalten.

In Vorgehensmodellen werden die einzelnen Phasen und Entwicklungsschritte sowie deren Aktivitäten festgelegt, das heißt es wird bestimmt, mit welchen Werkzeugen etwas auszuführen ist. Die einzelnen Phasen und Entwicklungsschritte gliedern sich bei den in der Praxis häufig eingesetzten Vorgehensmodellen in die folgenden vier Punkte [Lei-2015, S. 266]:

- Analyse
- Entwurf (Design)
- Realisierung (Implementierung)

Der Analysephase, welche sich in Ist- und Soll-Analyse untergliedert, wird eine besonders hohe Bedeutung zugeschrieben, da sich meist erst am Ende dieser Phase entscheidet, ob ein Projekt durchgeführt wird oder nicht [Lei-2015, S. 266]. Den vier vorgestellten Phasen lassen sich nicht immer alle Aktivitäten eindeutig zuordnen, deshalb muss zwischen Phasen und Tätigkeitsschritten unterschieden werden [Gol-2011, S. 88]. Der Begriff „Phase“ wird mit einer zeitlichen, sequenziell definierten Abfolge assoziiert, die eine hierarchische Abarbeitung der Aktivitäten mit sich bringt. Im Gegensatz dazu können bei Tätigkeitsschritten, wie z. B. Projektfortschrittsstufen, die sich aus Entwicklungsschritten zusammensetzen, voneinander unabhängige Aufgaben parallel absolviert werden [Bro-2013, S. 85ff.].

2.2.2 Phasenbezogene Vorgehensmodelle

Vorgehensmodelle unterteilen sich zudem in phasenbezogene und präskriptive Modelle. Das Vorgehen bei phasenbezogenen Modellen legt die Struktur fest. Somit wird festgehalten, welche Aufgabe von welcher Qualifikation und unter Nutzung welcher Methode umgesetzt wird. Weit verbreitete Vorgehensmodelle hierfür sind das Wasserfall-, das Spiral- und das V-Modell. Präskriptive Vorgehensmodelle werden hingegen im Qualitätsmanagement angewendet, wobei der Fokus auf einer verbesserten Ausführung der einzelnen Arbeitsschritte liegt [Hof-2018] [fml-2020a, S. 24]. Für diese Forschungsarbeit sind phasenbezogene Modelle relevant und werden daher im Folgenden vorgestellt.

Wasserfallmodell

Ein bekannter Ansatz für die strukturierte Entwicklung von Methoden und Systemen ist das Wasserfallmodell, auch als Phasenmodell bezeichnet. Es ähnelt einem sequenziellen Prozess, bei dem jeder Schritt auf dem vorhergehenden Schritt basiert. Im ursprünglichen Wasserfallmodell, welches in den 1970er Jahren vorgestellt wurde, umfassen diese Schritte die Phasen: Anforderungen, Analyse, Design, Implementie-

rung/Kodierung, Verifikation/Test und Betrieb [Roy-1987]. Der starre sequenzielle Ablauf der einzelnen Phasen schränkt jedoch die Flexibilität der Projektdurchführung ein. Dies hat zur Folge, dass die Anforderungen von Beginn an genau definiert sein müssen, da spätere Änderungen im Projektverlauf nur schwer implementiert werden können. Zwar bieten die Rückkopplungen zwischen den einzelnen Phasen eine gewisse Möglichkeit der Adaption, jedoch ist diese nicht über mehrere Phasen möglich [Sch-2010, S. 48f.]. Wie die meisten Vorgehensmodelle hat auch das Wasserfallmodell seinen Ursprung in der Softwareentwicklung. Das Prinzip ist allerdings auf die Entwicklung jedes beliebigen Systems anwendbar [fml-2020a, S. 24f.].

V-Modell

Das V-Modell erweitert das Wasserfallmodell um qualitätssichernde Funktionen in jeder einzelnen Projektphase. Nach jeder dieser Phasen folgt die Umsetzung und der Test, woraus sich für jede Phase konkrete Produkte ergeben. Produkte beschreiben den Output einer Aktivität [Ver-2002, S. 35]. Seinen Namen erhält das V-Modell durch zwei V-förmig angeordnete Arme, dem absteigenden Arm als Analyse und dem anschließenden aufsteigenden Arm als Synthese sowie einer Implementierungsphase an der Verbindungsstelle der beiden Arme. Die Arme sind durch verschiedene Validierungsstufen miteinander verbunden [Brö-1995] [VDI-2206, S. 26ff.]. Demzufolge schafft das V-Modell die Möglichkeit, die Aktivitäten und Produkte nicht nur im Entwicklungsprozess, sondern auch im Verwaltungsprozess festzulegen. Der Fokus liegt dabei auf der Verifikation, die die Überprüfung der Übereinstimmung zwischen einem Produkt und seiner Spezifikation beschreibt sowie der Validierung, welche die Überprüfung der Eignung eines Produkts für seinen Einsatzzweck beschreibt [Bal-1998, S. 101].

Da auch vom V-Modell die Allgemeingültigkeit angestrebt wird, bietet es die Möglichkeit des Tailorings („*Maßschneiderns*“), um das Modell auf verschiedene Projekte abzustimmen. Das Tailoring bezieht sich nicht nur auf das Weglassen von Teilen, sondern auch auf die Anpassung, beispielsweise durch das Ergänzen von Vorgehensbausteinen. Nachteil des V-Modells ist hingegen die Ausrichtung auf Großprojekte. Bei kleineren Projekten kann es zu einer unnötigen Produktvielfalt und „*Software-Bürokratie*“ führen [Mas-2012, S. 679].

V-Modell XT

Das V-Modell XT basiert auf dem zuvor beschriebenen V-Modell. Es ist im Vergleich zum V-Modell modularer und flexibler aufgebaut und kann somit einfacher an neue Projektgegebenheiten angepasst werden (Tailoring). Die Module sind verschiedene Vorgehensbausteine, welche sich aus den Produkten, daraus abgeleiteten Aktivitäten, den zugehörigen Rollen und Projektergebnissen zusammensetzen. Dieser Aufbau soll

die Anwendbarkeit bei sich ändernden Produkthanforderungen vereinfachen. Dennoch bringt das V-Modell XT analog zum V-Modell auch noch einen großen organisatorischen Aufwand mit sich, der nur in mittleren oder großen Projekten vertretbar ist [Mas-2012, S. 679f.] [Höh-2008, S. 2ff.] [fml-2020a, S. 25f.].

Spiralmodell

Das Spiralmodell wurde Mitte der 1980er Jahre von *Barry W. Boehm* beschrieben und stellt ein übergeordnetes Modell zur formalisierten Beschreibung weiterer Modellkonzepte (Metamodell) dar, welches das Produkt in einzelne Teilprodukte untergliedert. Mithilfe iterativer Prozesse sollen Projektrisiken kontrollierbar und minimiert werden. Beim Spiralmodell werden vier grundlegende Schritte solange zyklisch durchlaufen, bis das Produkt in der gewünschten Qualität vorliegt [Boe-1988, S. 64f.]. Die vier Schritte beinhalten [Sch-2010, S. 57] [Mas-2012, S. 680] [fml-2020a, S. 26f.]:

- Definition von Zielen und Alternativen
- Einschätzung des Risikos
- Entwicklung und Durchführung von Tests und Evaluierungen der aktuellen Ergebnisse
- Feedback zur erstellten Lösung und Planung für die nächste Iteration

Inkrementelles Vorgehensmodell

Die Besonderheit am inkrementellen Vorgehen ist die schrittweise Entwicklung verschiedener Teile des Systems zu unterschiedlichen Zeiten mit verschiedenen Geschwindigkeiten. Dabei steht der Endzustand in der Regel nicht fest. Das Projekt wird durch Ergänzungen iterativ erweitert. Für die Erstellung jeder Version werden alle Phasen von der Analyse über den Entwurf und die Implementierung bis hin zur Auslieferung durchlaufen, bis die jeweilige Version abgeschlossen ist. Durch den zeitlichen Versatz können gewonnene Erkenntnisse sowie sich ändernde Anforderungen mit in die neuen Versionen einfließen. Des Weiteren können Anforderungen nach ihrer Relevanz den entsprechenden Versionen zugeordnet werden. Bei der Verwendung des inkrementellen Vorgehens ist jedoch zu beachten, dass die einzelnen Komponenten, die in den Versionen entwickelt werden, aufeinander abgestimmt sein müssen, damit eine stabile Architektur gewährleistet werden kann. Sollen fixierte Leistungen in einem Pflichtenheft des Auftraggebers umgesetzt werden oder lässt sich das angestrebte Projektergebnis nicht sinnvoll in Teilabschnitte separieren, so ist von dem inkrementellen Vorgehen abzuraten [Wie-2007, S. 65ff.] [Sch-2010, S. 56f.] [fml-2020a, S. 28].

Prototyping

Streng genommen handelt es sich beim prototypischen Vorgehen um eine Entwicklungsmethode. In der Literatur existieren unterschiedliche Formen des Prototypings,

wie etwa das Rapid-Prototyping [Chu-2010, S. 10ff.] oder das evolutionäre Prototyping [Car-2001]. Die Besonderheit hier ist die Reihenfolge von Entwurfs- und Entwicklungstätigkeiten. Zunächst wird ein Probemodell (Prototyp) entwickelt und basierend darauf die Anforderungen angepasst. In einem iterativen Prozess wird dann innerhalb kürzester Zeit ein funktionsfähiges Modell erstellt, welches zum Testen und Beurteilen dient. Dabei ist es möglich, unterschiedliche Prototypen zu entwickeln, um verschiedene Möglichkeiten miteinander zu vergleichen [Mas-2012, S. 685ff.]. Das Ziel des prototypischen Vorgehens ist es, frühzeitig Fehler oder Schwächen eines zuvor aufgebauten Prototyps zu erkennen, bevor innerhalb des realen Anwendungsfalls immens hohe Kosten für Anpassungen entstehen [Grü-2019]. Vorteile des Prototypings sind die gute Integrierbarkeit in das inkrementelle Vorgehensmodell sowie in das V-Modell XT. Außerdem haben die Entwickler die Möglichkeit, kreative Ideen und Lösungsvorschläge mit in den Prototyp einfließen zu lassen. Auf der anderen Seite entsteht ein höherer Entwicklungsaufwand durch die zusätzliche Erstellung des Prototyps [Mas-2012, S. 687] [fml-2020a, S. 28f.].

Agile Vorgehensmodelle

Klassische Vorgehensmodelle, wie z. B. das Wasserfall-, Spiral- oder V-Modell sind für kleinere Projekte häufig zu starr und zu bürokratisch. Agile Vorgehen können dem entgegenwirken. Sie besitzen schnelle Entwicklungsiterationen und betrachten auch soziale Aspekte während des Entwicklungsprozesses. Bereits seit den 1990er Jahren haben agile Vorgehen an Popularität gewonnen. Durch das von *Kent Beck* veröffentlichte Buch zu Extreme Programming Ende der 1990er Jahre wurde der Weg für agile Prozesse und Methoden geebnet [Bec-2007]. Extreme Programming ist ein inkrementelles, iteratives Vorgehen, in dem sich das Projekt unter starker Einbindung des Kunden schrittweise dem Projektziel nähert. Geprägt ist Extreme Programming vor allem von seinen Werten, Prinzipien und Praktiken. Die vier bekanntesten sind: Kommunikation, kontinuierliche Integration, testgetriebene Entwicklung und Neuausrichtung [Kuh-2013].

Das gängigste agile Vorgehen ist Scrum [Ver-2007]. Scrum ist ein empirisches, inkrementelles und iteratives Vorgehen. Konkrete Anwendungen basieren auf Erfahrungen und das Vorgehen findet schrittweise in sich wiederholenden Etappen, sogenannten „Sprints“, statt. Ein Sprint dauert in der Regel 30 Tage. Innerhalb dieser Zeit wird das Produkt verbessert und Funktionalitäten hinzugefügt. Am Ende jedes Sprints sollte ein funktionsfähiges Zwischenprodukt vorhanden sein [Sch-2004]. Scrum ist mit einem vergleichbaren geringen Administrationsaufwand verbunden. Ein Nachteil ist hingegen der fehlende Überblick über die gesamte Projektstrecke [Gol-2015, S. 59].

Bewertung der diskutierten phasenbezogenen Vorgehensmodelle

Die vorgestellten phasenbezogenen Vorgehensmodelle liefern allesamt zwar wichtige und relevante Inhalte für diese Forschungsarbeit, sie verfolgen aber unterschiedliche Schwerpunkte und Zielsetzungen. Anhand vordefinierter Kriterien, welche sich an *Maske* anlehnen, ist eine Bewertung der vorgestellten phasenbezogenen Vorgehensmodelle von der Autorin vorgenommen worden [Mas-2012, S. 692]. Die in Tabelle 2-2 definierten Bewertungskriterien orientieren sich dabei bereits an der Zielsetzung dieser Arbeit, der Entwicklung eines Vorgehens für die Implementierung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich und stellen somit Kernanforderungen an das phasenbezogene Vorgehensmodell dar.

Tabelle 2-2: Gegenüberstellung und Bewertung phasenbezogener Vorgehensmodelle in Anlehnung an [Mas-2012]

		Bewertungskriterien					
		1. Berücksichtigung der Flexibilität des Phasenschemas	2. Berücksichtigung wechselnder und/oder unbekannter Anforderungen	3. Berücksichtigung der Nähe zum Kunden	4. Berücksichtigung der Risikominimierung	5. Berücksichtigung der Vermeidung von Bürokratie	6. Berücksichtigung eines strukturellen Vorgehens
Diskutierte phasenbezogene Vorgehensmodelle	Wasserfallmodell	○	○	○	○	○	●
	V-Modell	○	○	○	◐	○	●
	V-Modell XT	◐	●	●	●	◐	●
	Spiralmodell	◐	◐	○	●	○	●
	Inkrementelles Vorgehensmodell	●	◐	●	◐	◐	○
	Prototyping	●	●	●	○	●	○
	Agile Vorgehensmodelle	●	●	●	◐	●	○

○ nicht erfüllt ◐ teilweise erfüllt ● erfüllt

Das erste Kriterium, die Flexibilität des Phasenschemas, sichert die Anpassungsfähigkeit der verschiedenen Phasen zu unterschiedlichen Zeiten. Diese Anforderung ist insbesondere für Entwicklungs- und Innovationsvorhaben, wie es die Implementierung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich darstellt, von Relevanz. Des Weiteren sollte das Modell in der Lage sein, wechselnde und/oder unbekannte Anforderungen

zu berücksichtigen, damit kurzfristige Änderungen miteinbezogen werden können. Die kontinuierliche Einbindung des Kunden erhöht zudem die Qualität des phasenbezogenen Vorgehensmodells und stellt somit das dritte Kriterium dar. Die Risikominimierung von Fehlentwicklungen ist eine weitere Anforderung, welche zum Erfolg des Modells beiträgt. Um phasenbezogene Vorgehensmodelle schlank und einfach zu gestalten, gilt es „Bürokratie“ zu vermeiden bzw. zu reduzieren. Demgegenüber steht jedoch die Anforderung, die strukturelle Vorgehensweise zu berücksichtigen, welche für die Organisation, den Ablauf und die Nachvollziehbarkeit des Modells relevant ist [Mas-2012, S. 689ff.].

Es zeigt sich, dass sich in Bezug auf die ausgewählten Bewertungskriterien Flexibilität, unbekannte Anforderungen, Nähe zum Kunden, Risikominimierung, Vermeidung von Bürokratie und strukturelles Vorgehen insbesondere das V-Modell XT, das inkrementelle Vorgehen, das Prototyping sowie die agilen Vorgehensmodelle eignen. Allerdings folgen die letzten drei phasenbezogenen Vorgehensmodelle im Vergleich zu den restlichen dem strukturellen Vorgehen nicht. Das V-Modell XT erfüllt hingegen durch seine Iterationsschleifen und das strukturierte Vorgehen das sechste Kriterium. Klassische Vorgehensmodelle, wie das Wasserfallmodell und das V-Modell erweisen sich als zu starr und bürokratisch. Innovationsgetriebene Projekte fordern ein Vorgehen, das zum einen anpassungsfähig und flexibel ist und zum andern einem gewissen Regelwerk und einer Struktur folgt. Aus diesem Grund lehnt sich das Vorgehen in dieser Forschungsarbeit an das V-Modell XT an.

2.2.3 Designtheorien und -methoden

Bis in die 1960er Jahre wurde Gestaltung (Design) eher als Kunst und weniger als wissenschaftliche oder technische Fachrichtung gesehen [Tom-2009]. Inzwischen existieren in Literatur und Praxis eine Vielzahl von Designtheorien und -methoden. Nach *Tomiyama et al.* beziehen sich Designmethoden auf die Frage, wie "*Design modelliert und verstanden werden kann*" [Tom-2009, S. 544]. Für *Pahl et al.* wiederum sind Designmethoden konkrete Vorgehensweisen für den Entwurf technischer Systeme. Sie umfassen Aktionspläne, die Arbeitsschritte und Entwurfsphasen inhaltlich und organisatorisch miteinander verknüpfen. Des Weiteren beinhalten sie Strategien, Regeln und Prinzipien zur Erreichung allgemeiner und spezifischer Ziele sowie Methoden zur Lösung individueller Designprobleme [Pah-2007, S. 9]. Zur Erreichung konkreter Designziele stellt dieser Abschnitt einen Überblick von Designtheorien und -methoden dar. Aufgrund der Vielzahl existierender Designmethoden wird dieser Abschnitt keineswegs eine vollständige Übersicht liefern, sondern vielmehr eine umfassende Auflistung verschiedener Ansätze nach *Tomiyama et al.* thematisieren [Tom-2009] [Tho-2009]. Diese Auflistung zeigt eine Klassifizierung verschiedener Designtheorien

und -methoden, die im Nachfolgenden vorgestellt werden. Eine vollständigere Liste bietet *Pahl et al.* [Pah-2007, S. 38ff.] [fml-2020c, S. 33ff.].

Axiomatic Design

Ende der 1970er Jahre wurde Axiomatic Design von *Nam Pyo Suh* vorgestellt. Axiomatic Design liefert ein wissenschaftliches, verallgemeinertes und systematisches Verfahren für den Entwurf von Systemen [Suh-1998] [Zhe-2019, S. 18]. Dabei werden komplexe Aufgaben systematisch analysiert und entsprechende Lösungen dazu entworfen, die alle Anforderungen an das finale Produkt oder Verfahren erfüllen. Es wird in einem breiten Spektrum von Anwendungen und auf unterschiedliche Weise eingesetzt und zählt zu einem weit verbreiteten Standard für den Systementwurf [Suh-1978] [Far-2016, S. 3ff.].

Axiomatic Design bietet somit eine systematische Methode zum Entwurf von komplexen Systemen. Dabei bezieht sich der Begriff komplex auf die Verflechtung von unterschiedlichen Parametern, welche voneinander abhängen. Um diese Verflechtung aufzulösen und zu strukturieren sowie eine theoretische Grundlage darzulegen, die auf logischen und rationalen Denkprozessen und Werkzeugen basiert, wurde Axiomatic Design entwickelt.

Der Kern von Axiomatic Design ist die Interkonnektivität verschiedener Domänen. Diese Domänen unterteilt *Suh* wie folgt [Suh-2001]:

- Die Kundendomäne beschreibt die Bedürfnisse und Wünsche der Kunden (*engl. Customer Needs, CM*) im Hinblick auf ein Produkt, einen Prozess, ein System oder ein Material
- In der Funktionsdomäne werden die Kundenbedürfnisse in funktionale Anforderungen (*engl. Functional Requirements, FR*) aufgeschlüsselt und Restriktionen festgelegt
- Die physische Domäne beinhaltet Gestaltungsparameter (*engl. Design Parameters, DP*) zur Lösung der spezifischen funktionalen Anforderungen
- Die Prozessdomäne wandelt die Gestaltungsparameter (*engl. Process Variables, PV*) in reale Prozesse um

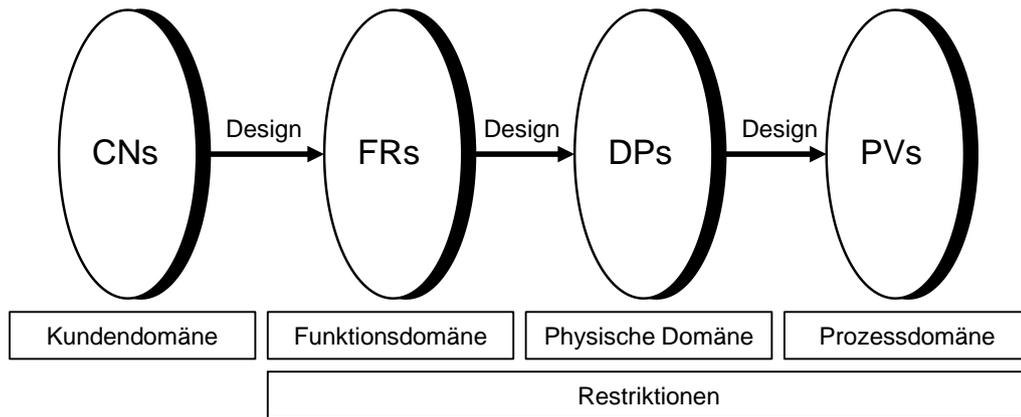


Abbildung 2-7: Die vier Domänen des Axiomatic Designs in Anlehnung an Suh [Lee-2006, S.454]

Neben den vier Domänen, die in Abbildung 2-7 dargestellt sind, spielen auch die beiden Axiome (Unabhängigkeit und Information), die zur Namensgebung der Methode geführt haben, bei der Auswahl mehrerer unterschiedlicher DPs eine entscheidende Rolle. Nach *Suh* ist eine Zuordnung (Mapping) dann ideal, wenn beide Axiome erfüllt sind [Suh-2001]:

- Axiom 1: **Unabhängigkeitsaxiom** – Bewahrung der Unabhängigkeit der funktionalen Anforderungen
- Axiom 2: **Informationsaxiom** – Minimierung der Informationen auf das Wesentliche

Das Unabhängigkeitsaxiom besagt, dass die zuvor definierten FRs erfüllt sein müssen ohne andere FRs zu beeinflussen. Demnach muss eine passende Kombination aus DPs ausgewählt werden, die jedes einzelne FR erfüllen und deren Unabhängigkeit aufrechterhalten. Das zweite Axiom repräsentiert den Informationsgehalt mehrerer DPs. Es wird das DP mit dem geringsten Informationsgehalt und der höchsten Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Erfüllung der FRs ausgewählt [Rau-2013, S. 103ff.] [Suh-2001].

Für die Sicherstellung des ersten Axioms, der Unabhängigkeit, verfügt die Methode Axiomatic Design über eine Designmatrix, welche die Beziehung zwischen FRs und DPs gegenüberstellt. Die daraus abgeleitete Gleichung lautet [Suh-1998, S. 191f.]:

$$\{FR\} = [DM]\{DP\} \quad (2-1)$$

Die FRs und DPs der Gleichung sind als Vektor definiert. Basierend auf dieser Gleichung ergibt sich die Design Matrix für drei FRs und drei DPs (Gleichung 2-2):

$$\begin{Bmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{Bmatrix} \quad (2-2)$$

Liegt eine Wechselwirkung zwischen einem FR und einem DP vor, so wird dies in der Design Matrix mit einem X gekennzeichnet. Besteht keine Abhängigkeit zwischen FR und DP wird dies mit 0 dargestellt. Daraus ergeben sich drei mögliche Darstellungsformen [Rau-2013, S. 105] [Suh-2005]:

Vollmatrix

Elemente oberhalb der Diagonalen sowie unterhalb der Diagonalen sind ungleich null. Somit ergibt sich ein vollständig gekoppeltes Design. Dies widerspricht dem Unabhängigkeitsaxiom und stellt daher eine „*schlechte*“ Gestaltungsweise dar, die durch einen Zirkelbezug gekennzeichnet ist (FRs und DPs stehen in einer Wechselwirkung zueinander). Diesem Effekt soll Axiomatic Design entgegenwirken, indem „*schlechte*“ Lösungen erkannt werden und anschließend versucht wird, diese durch ein neues Design zu entkoppeln [Lee-2006] [Rau-2013, S. 105f.].

Triangularmatrix

Ist das Element a_{ij} oberhalb oder unterhalb der Diagonale X , so handelt es sich um eine Triangularmatrix. Dieses entkoppelte Design tritt ein, wenn FRs von mehreren DPs erfüllt werden. Das Unabhängigkeitsaxiom ist in diesem Fall nicht mehr vollständig erfüllt. Die Triangularmatrix ist pfadabhängig, stellt jedoch trotzdem ein „*gutes*“ Design dar, sofern der Pfad in der korrekten Abfolge durchlaufen wird [Rau-2013, S. 105f.].

Diagonalmatrix

Erfüllt jedes DP das genau zugehörige FR ($a_{ij} = X$ für $i = j$), so handelt es sich um eine ungekoppelte Matrix, welche das bestmögliche und somit ein „*ideales*“ Design aufweist [Rau-2013, S. 105f.].

Ziel von Axiomatic Design ist es, während des Mapping-Prozesses zwischen den Domänen und unter Berücksichtigung der zwei Axiome ein robustes Design zu erzeugen [Suh-1998]. Allerdings ist es nicht immer möglich, alle Anforderungen zu zerlegen, was dazu führt, dass Anforderungen um- oder neuformuliert werden müssen [Tat-1999].

Design Decision-Making Methods

Im weiteren Sinne umfassen Design Decision-Making Methoden die Generierung von Gestaltungsalternativen, die Erstellung eines Bewertungsschemas zur Analyse der Alternativen sowie die Auswahl der Design-Alternative [Sim-1977]. Im Speziellen beinhaltet jeder Entscheidungsprozess drei grundlegende Phasen [Tom-2009, S. 552]:

- Festlegung des Ziels oder der Ziele
- Ermittlung der Rahmenbedingungen
- Identifizierung und Bewertung von Alternativen

Um eine Alternative nicht nur identifizieren sondern auch bewerten zu können, müssen Designer ein klar definiertes Designziel vor Augen haben [Kee-2004, S. 450] [Tom-2009, S. 553].

Design for X

In den frühen 1960er Jahren wurde die Designmethode Design for X (DFX) bekannt. Das X bezieht sich auf ein Leistungsmaß für Design, wie beispielsweise Design for Manufacture (DFM) oder Design for Environment (DFE) [Die-2008, S. 380]. Daneben wird es auch verstärkt für die Prozessoptimierung, wie z. B. die „*workflowgerechte*“ Gestaltung des Entwicklungsprozesses, eingesetzt [Pon-2008, S. 26] [Mee-2006]. *Ponn et al.* definieren DFX als eine Reihe von Gestaltungsrichtlinien für die Produktentwicklung und Konstruktion zur Verfolgung verschiedener Ziele, etwa in Bezug auf Kosten, Gewicht oder Produktion [Pon-2008, S. 26]. Diese Gestaltungsrichtlinien werden häufig mit computergestützten Werkzeugen umgesetzt [Die-2008, S. 380].

Design Structure Matrix

Die Design Strukturmatrix (DSM) ist eine Methode zur Darstellung komplexer Systeme und ihrer Beziehungen [Ste-1981]. Sie wird auch als Informationsaustauschmodell gesehen, welche die Darstellung komplexer Aufgabenbeziehungen ermöglicht, um eine sinnvolle Abfolge der modellierten Aufgaben zu bestimmen [Yas-2004, S. 1]. Zudem ist DSM ein beliebtes Darstellungs- und Analysewerkzeug für die Systemmodellierung, insbesondere zu Zwecken der Zerlegung und Integration [Bro-2001, S. 292]. Die DSM ist eine quadratische Matrix mit Zeilen und Spalten. Die Zellen auf der Diagonale stellen die Aktivitäten dar, die von oben links nach unten rechts in einer ungefähr zeitlichen Reihenfolge wie ein N^2 -Diagramm⁷ mit dem Zusatz einer Zeitbasis zu verstehen sind [Lan-1977]. Außerhalb der Diagonalen liegende Zellen zeigen die Abhängigkeit eines Prozesselements oder einer Aktivität von einem anderen an. Wird eine Spalte von

⁷ Ein N^2 -Diagramm, auch bekannt als N-Quadrat-Diagramm, besitzt die Form einer Matrix, die funktionale oder physikalische Schnittstellen zwischen Systemelementen darstellt [Bec-2000].

oben nach unten gelesen, so handelt es sich um Eingangsquellen, wird sie von unten nach oben gelesen, sind es Ausgangsquellen [Bro-2002, S. 184] [Ste-1981].

Der Hauptvorteil von DSM ist eine strenge Diagrammstruktur, die es ermöglicht, sequenzielle und parallele Aktivitäten zu modellieren und nebenbei voneinander abhängige Beziehungen der Aufgaben zu beschreiben [Szé-2012, S. 701] [Lam-2012, S. 276]. Die Anwendung von DSM kann computergestützt durchgeführt werden, daher können grundsätzlich auch große Problemstellungen bearbeitet werden. Allerdings kann eine ausschließlich computergestützte Auswertung das Ergebnis schwer nachvollziehbar machen, was die Akzeptanz dieser Methode schwächen kann [Kra-2018, S. 187]. Des Weiteren eignet sich DSM nur dann, wenn alle Komponenten des Systems im Voraus bekannt sind [Zhe-2019, S. 18] [Don-2002, S. 55ff.].

Failure Mode and Effect Analysis

Pahl et al. definieren die Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) als eine Analyseverfahren zur systematischen Identifizierung möglicher Fehler und zur Abschätzung der damit verbundenen Risiken (Auswirkungen) [Pah-2007, S. 529]. Diese Methode zur Risikoanalyse von Produkten und Prozessen hatte ihren Ursprung zunächst im militärischen Bereich, dann in der Luft- und Raumfahrt und anschließend in der Automobilindustrie [Tom-2009, S. 554] [Liu-2018, S. 763]. Im Automobil- sowie Zuliefererbereich hat sich die FMEA als Standard etabliert [AIA-2019].

Das Ziel der FMEA ist die Begrenzung oder Vermeidung von Risiken. Eine direkte Fehleranalyse und deren Folgen und Ursachen sind der Kern der Methode. Das bedeutet auch, dass nur direkte Beziehungen zwischen Folgen und Ursachen ermittelt werden. In der Regel wird die FMEA bei der Entwicklung neuer Produkte angewendet. Die Methode kann sich auf das Design, die Entwicklung, den Prozess oder die Produktion beziehen. Die Design-FMEA wird beispielsweise zur Überprüfung der Anforderungslisten und deren festgelegten Funktionen eingesetzt [Pah-2007, S. 529ff.].

Entscheidende Vorteile der FMEA sind die Möglichkeit, den Zusammenhang zwischen Fehlern und Fehlfunktionen frühzeitig zu erkennen und somit Zeit bei der Durchführung einzusparen [Haf-2005, S. 23]. Nachteilig hingegen ist der steigende Zeitaufwand, der mit dem Umfang und der zu definierenden Betrachtungstiefe der Analyse zusammenhängt [Kri-2020].

Quality Function Deployment

Quality Function Deployment (QFD) ist eine Methode der Qualitätssicherung des japanischen Total-Quality-Management-Ansatzes [Aka-1990]. *Sullivan* beschreibt QFD als ein Gesamtkonzept, das ein Mittel zur Umsetzung der Kundenanforderungen in die

entsprechenden technischen Anforderungen für jede Phase der Produktentwicklung und Produktion bietet [Sul-1986, S. 39ff.]. Es handelt sich demnach um eine kundenorientierte Methode zur Neuentwicklung oder Verbesserung von Produkten. Ziel von QFD ist die Produktentwicklung, das Qualitätsmanagement und die Analyse der Kundenbedürfnisse. Dabei werden alle Unternehmensbereiche in die Qualitätsverantwortung miteinbezogen. Im Laufe der Zeit wurden die Funktionen von QFD auf weitere Bereiche, wie unter anderem das Design, die Planung und die Entscheidungsfindung ausgeweitet [Cha-2002, S. 467].

QFD dient nicht allein zur systematischen Entwicklung von Produktkonzepten, sondern bietet auch den konzeptionellen Rahmen zur Verzahnung nachfolgender Phasen der Produktentstehung [Alb-2007, S. 706]. Zu den Hauptvorteilen von QFD zählen die Verbesserung der internen Kommunikation sowie ein strukturierter Planungsablauf in der frühen Entwicklungsphase, der von einer starken Kundenorientierung geprägt ist. Dem gegenüber stehen die hohe Komplexität der Methode sowie die fehlende Berücksichtigung explizit auf einzelne Produktkomponenten bezogener Kundenanforderungen [Alb-2007, S. 706ff.].

Pugh-Methode

Die Pugh-Methode vergleicht verschiedene Lösungskonzepte durch ausgewählte und gewichtete Kriterien relativ zu einem Referenzkonzept [Pug-1991]. Dadurch kann untersucht werden, ob das jeweilige Konzept besser, schlechter oder gleich gut wie das Referenzkonzept ist. Die Konzeptauswahl wird mithilfe einer Tabelle/Matrix realisiert. Bei der Pugh-Methode handelt es sich demnach um eine relative Vergleichstechnik [Die-2008, S. 277]. Das Vorgehen kann nicht nur für die Neuentwicklung und Modifikation von Produkten, Systemen oder Prozessen eingesetzt werden, sondern auch für die Entscheidungsfindung [Tom-2009, S. 559].

Das Ziel ist die Identifikation des „besten“ Konzepts sowie die Erstellung einer Rangfolge möglicher Lösungskonzepte. Dabei zeichnet sich die Pugh-Methode durch ein systematisches und zugleich kreatives Vorgehen aus. Des Weiteren werden Risiko, Zeit und Ressourcen für ungeeignete Lösungskonzepte erheblich reduziert. Ist die Auswahl der Vergleichskriterien jedoch unzureichend, so wirkt sich dies auch auf das Ergebnis aus. Es ist nicht aussagekräftig. Ein weiterer Nachteil der Methode ist die geringe Granularität der paarweisen Vergleiche [Kno-2018].

Bewertung der diskutierten Designtheorien und -methoden

Vergleichbar zu den bereits vorgestellten phasenbezogenen Vorgehensmodellen liefern auch die diskutierten Designtheorien und -methoden, die sich an die Liste von *Tomiyama et al.* anlehnen, einen Beitrag zu dieser Forschungsarbeit [Tom-2009]. In

Anlehnung an die von *Rauch* ermittelten Bewertungskriterien, welche der Tabelle 2-3 zu entnehmen sind, wurden die vorgestellten Designtheorien und -methoden von der Autorin bewertet [Rau-2013, S. 99].

Tabelle 2-3: Gegenüberstellung und Bewertung von Designtheorien und -methoden

		Bewertungskriterien				
		1. Berücksichtigung der Flexibilität bei der Anpassung und Getsaltung	2. SystematischeAbleitung von Kundenanforderungen	3. SystematischeAbleitung von Getsaltungsparametern	4. Berücksichtigung der Wechselwirkung zwischen Getsaltungsparametern	5. Berücksichtigung der Relevanz und Anforderungsspezifität auf Prozesse
Diskutierte Designtheorien und -methoden	Axiomatic Design	●	●	●	●	◐
	Design Decision-Making Methods	◐	○	◐	●	●
	DFX	●	○	○	○	●
	DSM	◐	○	●	●	●
	FMEA	◐	○	○	○	◐
	QFD	●	◐	●	◐	○
	Pugh-Methode	●	○	○	○	●

○ nicht erfüllt ◐ teilweise erfüllt ● erfüllt

Die Designmethode sollte veränderbar und flexibel bei der Anpassung und Gestaltung sein, um nachträgliche Änderungen berücksichtigen zu können. Der Kern eines jeden Produkts oder Prozesses sind die Anforderungen des Kunden. Daher sollte die Designmethode diese Kundenanforderungen systematisch ableiten können. Ebenso verhält es sich mit den Gestaltungsparametern. Wechselwirkungen und Abhängigkeiten zwischen Gestaltungsparametern können zu Inkonsistenz führen und sollten demnach in der Designmethode berücksichtigt werden. Das letzte Bewertungskriterium, die Relevanz und Anforderungsspezifität auf Prozesse, sorgt für die gezielte Definition der Anforderungen und unterstützt dadurch die Auswahl einer geeigneten Methode.

Wie aus Tabelle 2-3 ersichtlich wird, erfüllt Axiomatic Design fast alle und DSM nahezu alle Kriterien. Beide Methoden fokussieren sich auf das Design komplexer Systeme sowie ihrer Beziehungen. Auf der einen Seite eignet sich DSM besser für das Design von Prozessen als Axiomatic Design. Auf der anderen Seite erfüllt Axiomatic Design

das zweite Kriterium, die systematische Ableitung von Kundenanforderungen, vollständig. Dieser Aspekt ist für die Entwicklung eines Vorgehens für die Implementierung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich von großer Bedeutung, da die Kundenanforderungen die funktionalen Anforderungen an das Vorgehen darstellen. Kunden sind dementsprechend nicht nur die Anwender von AMRs, sondern auch die Hersteller, gesetzliche und werksspezifische Regularien sowie viele weitere Stakeholder, die Einfluss auf die Implementierung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich haben. Aufgrund der Eigenschaften von Axiomatic Design, der Flexibilität auch nachträglich Änderungen und Ergänzungen im Design vornehmen zu können, der systematischen Ableitung und Zerlegung von Kundenanforderungen und Gestaltungsparametern sowie der Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen den Gestaltungsparametern, wird Axiomatic Design im weiteren Verlauf dieser Forschungsarbeit in die Konzeption des Vorgehensmodells miteinfließen.

2.2.4 Grafische Modellierungssprachen

Der Entwurf komplexer Produkte, Systeme oder Prozesse fordert ein strukturiertes, modulares Vorgehen sowie angemessene Techniken und Tools zur präzisen Beschreibung der Anforderungen. Grafische Modellierungssprachen stellen solch eine Technik dar [Fle-2018, S. 1ff.]. Sie bestehen aus Notationen und Theoremen und bilden somit eine wissenschaftlich fundierte, werkzeuggestützte Technik für einen Ausschnitt der menschlich wahrgenommenen Realität [Bro-2007, S. 3ff.]. Jede grafische Modellierungssprache verfügt über eine eigens festgelegte Syntax, die über eine Notation oder ein Metamodell beschrieben werden kann [Hes-2008, S. 377ff.]. Grafische Modellierungssprachen unterstützen somit die in den vorherigen Abschnitt beschriebenen Modelle und Methoden. Sie schaffen einen definierten Ausgangspunkt, auf den sich alle beteiligten Akteure beziehen können. Akteure können Personen oder Computersysteme sein.

Das Ziel grafischer Modellierungssprachen ist es, die Struktur, Schnittstellen, innere Abläufe und Anforderungen von Organisationssystemen auf einer höheren Abstraktionsebene abzubilden. Spätestens seit den 1990er Jahren, als die erste Version von Unified Modelling Language (UML) erschien, hat die computergestützte Visualisierung von Systemen und Prozessen begonnen. Neben UML existieren weitere grafische Modellierungssprachen wie beispielsweise die Business Process Model and Notation (BPMN), Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) oder Petri-Netze. Modellierungssprachen können skript- oder diagrammbasierter Natur sein. Diagrammbasierte Sprachen untergliedern sich nochmals in datenfluss-, kontrollfluss- und objektorientierte Methoden. *Gadatsch* bietet eine detaillierte Erläuterung von diagrammbasierten Modellierungssprachen [Gad-2020, S. 87ff.] [fml-2020b, S. 29ff.]. Nachfolgend werden exemplarisch zwei kontrollflussorientierte Methoden beschrieben.

Business Process Model and Notation

In den 1985er Jahren wurden von *Stephen A. White* erstmals „Swimlanes“ für die Prozessvisualisierung verwendet [Whi-2004]. Seit 2005 wird die Notation BPMN von der Object Management Group (OMG) weiterentwickelt und gepflegt. Im Juli 2013 wurde BPMN 2.0 offiziell in der ISO19510 zum internationalen Standard erhoben [ISO-19510] [Kos-2014, S. 10]. BPMN kann mit der standardisierten grafischen Darstellung von Geschäftsprozessen die Abfolge von Prozessen (Workflows) und den Nachrichtenaustausch zwischen verschiedenen Prozessen, der mithilfe der horizontalen „Swimlanes“ dargestellt wird, spezifizieren. Dadurch können auch komplexe Prozesse mit mehreren Teilnehmern, die sowohl organisationsintern als auch extern koordiniert sind, modelliert werden [Lab-2010, S. 3]. Auf diese Weise ermöglicht BPMN eine standardisierte Brücke für die Lücken zwischen dem Prozessdesign und der Prozessimplementierung [Whi-2004, S. 1].

BPMN benötigt aufgrund der Vielzahl der Symbole und der komplexen Notation Softwarewerkzeuge. Unterschiedliche Tools, wie z. B. die Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS), der Signavio Process Editor, Microsoft Visio oder BonitaSoft eignen sich zur softwaregestützten Visualisierung. Die fünf zentralen Gruppen von BPMN-Elementen sind Flussobjekte, verbindende Objekte, Artefakte, Teilnehmer und Daten [Fre-2014, S. 23]. Abbildung 2-8 zeigt die Basiselemente von BPMN.

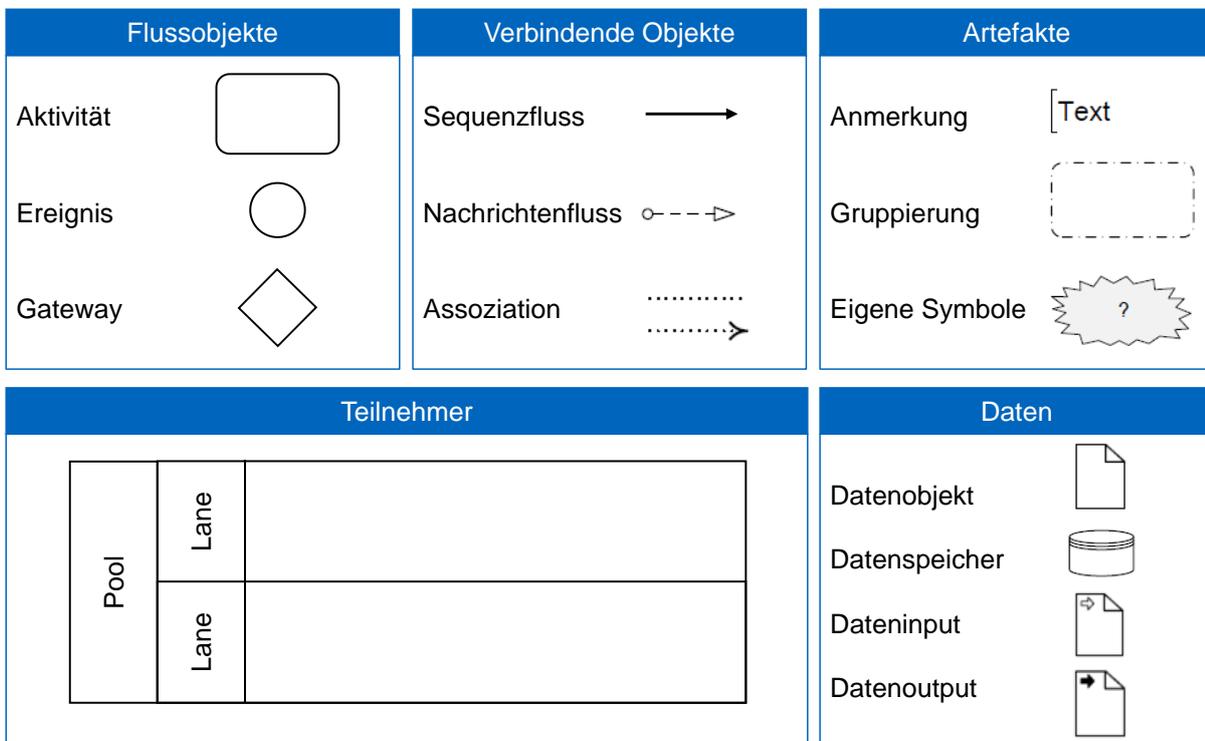


Abbildung 2-8: BPMN-Basiselemente in Anlehnung an Freund et al. [Fre-2014]

Neben den Vorteilen, wie der vereinfachten Darstellung komplexer Prozesse, weist BPMN auch Schwächen auf, so etwa der hohe Einarbeitungsaufwand bei der Nutzung der vollständigen Notation [Gad-2020, S. 140]. Für die Abbildung von Informationssystemen und Sekundärinformationen liefert BPMN kein standardisiertes Konzept. An dieser Stelle können die Darstellung und Abstraktionsebenen stark variieren [Bec-2009, S. 78] [fml-2020b, S. 31.34].

Ereignisgesteuerte Prozessketten

Im Rahmen von ARIS haben im Jahr 1992 *Scheer et al.* die EPK entwickelt [Sch-1995]. EPK ist eine grafische Modellierungssprache und dient zur Darstellung von Geschäftsprozessen sowie der Prozessorganisation (Abläufe und Arbeitsschritte) [Sta-2006, S. 59]. Die EPK verbindet die Funktionen, die eine Organisation ausführen kann, auf Grundlage von auftretenden Ereignissen miteinander [Fle-2018, S. 78]. Dabei stellt der Ausgangspunkt eines jeden Prozesses ein Ereignis dar. Nach dem Ereignis folgt eine zu erfüllende Funktion [Gad-2020, S. 106]. Die vier Grundelemente der EPK lauten [Sch-1995]:

- Funktion (ändert den Zustand von Objekten)
- Ereignis (löst die Zustandsänderung von Objekten aus)
- Kante (verknüpft Funktionen und Ereignisse)
- Konnektor (verbindet die Funktionen und Ereignisse zu einem Prozess)

Abbildung 2-9 zeigt die EPK-Grundelemente und deren Symbole.

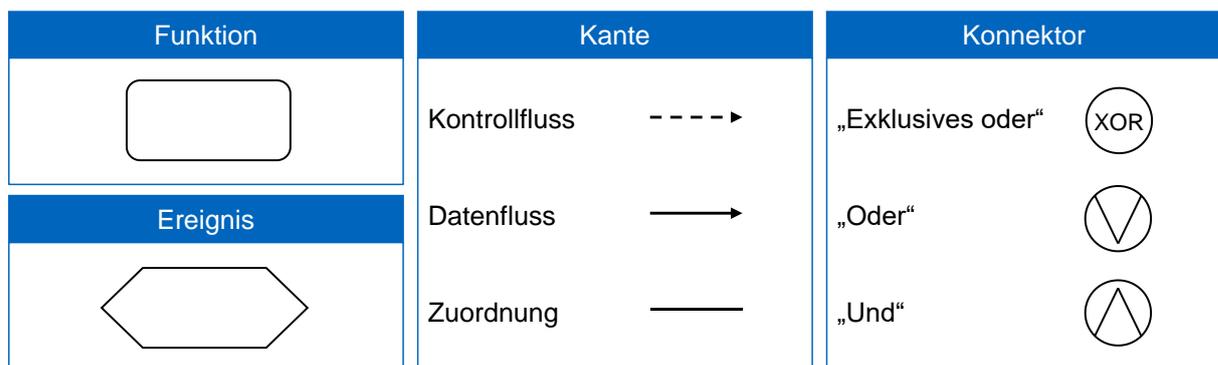


Abbildung 2-9: EPK-Grundelemente in Anlehnung an Scheer et al. [Sch-1995]

Der XOR-Konnektor repräsentiert Entscheidungen, bei denen genau eine Alternative gewählt werden muss. Wird aus einer oder mehreren Alternativen gewählt, wird der Oder-Konnektor eingesetzt. Der Und-Konnektor ermöglicht parallel ablaufende Prozesszweige. Die Konnektoren der EPK orientieren sich an den Operatoren der Bool'schen Logik. Ereignisse und Funktionen werden in gerichteten Graphen mit Kanten und Konnektoren in einer 1:1-Zuordnung verbunden. Eine Ausnahme bilden hier

logische Verknüpfungen. Innerhalb einer solchen Verknüpfungskette wechseln sich Ereignisse und Funktionen ab [Sch-1998, S. 125ff.].

Im Laufe der Zeit wurde die EPK um weitere Symbole zur Beschreibung von Organisationseinheiten, Daten und Anwendungssystemen ergänzt und trägt den Namen erweiterte ereignisgesteuerte Prozesskette (eEPK). Bis in das Jahr 2008 war die EPK/eEPK die dominierende Notation im deutschsprachigen Raum. Das änderte sich jedoch mit dem Aufkommen von BPMN. Zwar weisen die beiden Modellierungssprachen Gemeinsamkeiten auf, sie basieren jedoch auf unterschiedlichen Denkansätzen. Das ARIS-Framework bietet inzwischen auch eine Prozessmodellierung mit BPMN an [Fre-2014, S. 110f.]. Die Abbildung von komplexen und kreativen Prozessen sowie Überwachungsfunktionen lassen sich durch die EPK nur bedingt darstellen. Außerdem kann die Top-Down-Modellierung zu Unübersichtlichkeit führen. Ein weiterer großer Nachteil der EPK-Modellierung ist, dass die modellierten Prozesse nicht automatisierbar sind [Bös-2014, S. 96ff.] [Gro-2016, S. 21ff.].

Bewertung der diskutierten grafischen Modellierungssprachen

Die in diesem Abschnitt betrachteten grafischen Modellierungssprachen sind unterschiedlich ausdrucksstark und haben aufgrund ihrer historischen Entwicklung unterschiedliche Schwerpunkte in der Darstellung von Prozessen. EPK eignet sich für die fachlich-konzeptionelle Ebene, wohingegen BPMN auch die operative Ebene betrachtet und somit die Brücke zwischen fachlich-konzeptioneller und operativer Ebene schlägt. Beide Notationen gehören zur Gruppe der kontrollflussorientierten Methoden [Bös-2013] [Gad-2020, S. 89]. Die Syntax ist bei EPK und BPMN festgelegt, das heißt die vorhandenen Symbolmengen sind definiert und die dazugehörigen Anordnungsregeln spezifiziert. Das konkrete Aussehen der Symbole wird ebenfalls mit der Notation beschrieben. Beide Modellierungssprachen können demnach mithilfe computergestützter Modellierungstools auf syntaktische Korrektheit überprüft werden [Obe-2014, S. 66].

In Anlehnung an *Obermeier et al.* werden folgende Kriterien für die Bewertung der grafischen Modellierungssprachen herangezogen: Verständlichkeit, Flexibilität und Korrektheit, Durchgängigkeit, Strukturierbarkeit und Anschaulichkeit. Die Gegenüberstellung und Bewertung ist durch die Autorin vorgenommen worden und in Tabelle 2-4 dargestellt.

Tabelle 2-4: Gegenüberstellung und Bewertung grafischer Modellierungssprachen [Obe-2014]

		Bewertungskriterien				
		1. Verständlichkeit	2. Flexibilität und Korrektheit	3. Durchgängigkeit	4. Strukturierbarkeit	5. Anschaulichkeit
Diskutierte grafische Modellierungssprachen	BPMN					
	EPK					

 nicht erfüllt
  teilweise erfüllt
  erfüllt

BPMN erfüllt im Vergleich zur EPK alle Kriterien, bis auf die Durchgängigkeit [Obe-2014, S. 65ff.] [Bös-2013]. Zwar eignet sich BPMN für die fachliche und technische Beschreibung von Geschäftsprozessen, welche durch die Business Process Execution Language (BPEL) realisiert werden kann, jedoch ist die Überführung einer statischen BPMN-Beschreibung in eine dynamisch ausführbare BPEL-Beschreibung wegen der unzureichend präzise beschriebenen BPMN-Konstrukte nur bedingt möglich [Obe-2014, S. 67]. BPMN hat die EPK weitestgehend abgelöst und gilt derzeit als ein weit verbreiteter Standard für die Geschäftsprozessmodellierung [Kos-2014, S. 2].

Für diese Forschungsarbeit wird BPMN als grafische Modellierungssprache für die Darstellung der Geschäftsprozesse im Rahmen der Ist-Analyse und der Ableitung der Referenzprozessbausteine angewandt. Die Vorteile von BPMN in Bezug auf die Verständlichkeit, Flexibilität und Korrektheit, Strukturierbarkeit sowie Anschaulichkeit überwiegen im Vergleich zu denen der EPK-Methode.

2.3 Forschungsbedarf und Aufgabenstellung

2.3.1 Abgrenzung des Forschungsbedarfs

In der aktuellen Forschung wird den einzelnen Teilgebieten Outdoor-Anwendungen, FTS, selbstfahrende Kraftfahrzeuge und autonome Systeme viel Aufmerksamkeit geschenkt. Allein im Bereich der mobilen Robotik hat sich der Einsatz von Robotern innerhalb der letzten zehn Jahre mehr als verdoppelt. Im Jahr 2019 wurden so viele Roboter in Betrieb genommen wie nie zuvor [IFR-2020, S. 8]. Auch im Bereich des autonomen Fahrens hat die Tragweite der Technologie längst den Bereich der herkömmlichen Automobilhersteller überschritten und das Interesse großer „Tech-Giganten“ wie Google, Apple und Uber geweckt [Hus-2019, S. 1275ff.]. Im Zuge dessen hat sich die Aufmerksamkeit der internationalen Forschung und Wissenschaft innerhalb der letzten Jahre verstärkt auf die Intelligenz und Autonomie solcher komplexen Systeme gerichtet. Technische, organisatorische und ethische Fragestellungen im Zusammenhang mit autonomen Systemen haben an Bedeutung gewonnen. Die Betrachtung von FTS tendiert sowohl in der Wissenschaft als auch in der Praxis immer mehr Richtung „smarte“ Anwendungen bzw. autonome Robotik. Literatur und Praxis liefern zwar einen großen Beitrag zu aktuellen Fragestellungen, allerdings werden die zuvor beschriebenen Teilgebiete primär einzeln und nicht zusammenhängend betrachtet. Zudem fehlt es an konkreten Implementierungsansätzen und Vorgehen für den Einsatz autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich. In der Praxis lassen sich vereinzelt Implementierungsvorgehen vorfinden, diese basieren jedoch häufig auf Erfahrungen und weniger auf einem strukturellen Vorgehen.

Vergleichbare Ansätze aus der Forschung und Wissenschaft für die Implementierung liefern beispielsweise *Kolberg et al.* [Kol-2008]. Die Autoren stellen eine Methode für die Gestaltung autonomer mobiler Roboter vor, die im Rahmen eines Robotikkurses an einer weiterführenden Schule entwickelt und gelehrt wurde. Die entwickelte Designmethode setzt sich aus sechs einzelnen Methoden zusammen: dem Konzeptentwurf, dem Fault-Tolerant Design, der Anforderungsanalyse, der Verwendung von Fuzzy-Logik für die Steuerung der Robotersysteme, kreativen Denkmethoden und dem Entwurf von Mikroprogrammierung⁸. Zusammenfassend zeigt diese Arbeit einen neuartigen Gestaltungsansatz zur Verbesserung der Robustheit und Zuverlässigkeit von autonomen mobilen Robotern [Kol-2008, S. 528f.]. Allerdings geht es um die Gestaltung des Roboters, des Produkts und nicht um die Gestaltung des gesamten Prozesses für die Einführung eines solchen Systems. Zudem wird der Outdoor-Einsatz nicht beleuchtet.

⁸ Mikroprogrammierung bezeichnet die Programmierung eines Mikrorechners mit den elementaren Bestandteilen von Befehlen [Kra-2022].

Zwar können Parallelen bei der Entwicklung eines Vorgehens für die Implementierung eines AMR auf dem Werksgelände gezogen werden, es muss jedoch zwischen dem Vorgehen bei der Entwicklung eines einzelnen Produkts und der Entwicklung eines gesamten Vorgehens für die Implementierung unterschieden werden.

Beiker beschreibt die Implementierung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems an der Stanford University [Bei-2015]. Ziel ist es, das Vorgehen und die Erfahrungen der Implementierung auf andere automatisierte Fahrzeuge zu übertragen. Das Vorgehen gliedert sich in neun Stufen. Zunächst werden unterschiedliche Betriebsphasen für das zu untersuchende Fahrzeug betrachtet, um es in einer Evaluationsphase zu klassifizieren und anschließend in einer Versuchsphase zu optimieren. In der zweiten Stufe wird die Auswahl des Fahrzeugkonzepts vorgenommen. Danach folgt die Risikobewertung und Rechtseinordnung. Die vierte Stufe beinhaltet die Vertragsgestaltung. Sie regelt die Haftung und legt die Rechtsperson fest. Daraufhin werden das Betriebsgebiet und die Betriebsszenarien definiert. Es folgt die Einrichtung des Transportsystems und die Zertifizierung des Personals. Um sicherzustellen, dass vor jedem Betrieb sowohl das Transportsystem als auch die Betriebsumgebung den Sicherheits- und Funktionsanforderungen entsprechend dem zertifizierten Betrieb genügen, wird auf Seite der Hersteller die Systemart mit einer Systemüberprüfung vorgegeben. Stufe acht beinhaltet die Bedienungsbeschreibung des Transportsystems für Nutzer und Passanten. Die letzte Stufe untersucht die Reaktionen der Öffentlichkeit auf das Transportsystem [Bei-2015, S. 287ff.].

Die Betrachtung aus Sicht des Outdoor-Einsatzes im öffentlichen Raum von Transportsystemen liefert einen wichtigen Beitrag. Wie bereits in den Grundlagen und dem Stand der Wissenschaft aufgezeigt wurde, spielen die Eigenschaften selbstfahrender Kraftfahrzeuge auch für den Einsatz autonomer mobiler Roboter eine entscheidende Rolle. Das systematische Zusammentragen und Zerlegen von Anforderungen sowie Ableiten von Lösungsansätzen beschreibt *Beiker* jedoch nicht.

Trenkle entwickelt ein Entwurfsmuster für FTS [Tre-2019]. Das Entwurfsmuster fokussiert fünf Themenbereiche: Modularität, Sicherheit, Mensch-Maschine-Interaktion, Navigation und dezentrale Steuerung. Kern des Musters sind die Wechselwirkungen der Themen untereinander sowie deren Beeinflussung auf die Entwicklung von FTS. Ziel des Entwurfsmusters ist zum einen die Strukturierung von Lösungsansätzen und zum anderen dient es als Hilfsmittel zur Entwicklung zukünftiger FTS. Der Aufbau des Musters orientiert sich an der Struktur von *Alexander et al.* [Ale-1979] und *Rebovich und DeRosa* [Reb-2012]. Es besteht aus den vier folgenden Elementen:

- Kontext (Zuordnung gewünschter Eigenschaften)

- Problem (Beschreibung negativer Aspekte von bestehenden Lösungen)
- Einflussgrößen (Einflüsse auf das Problem sowie Vor- und Nachteile möglicher Lösungsansätze)
- Lösung (Lösungsvorschlag für das Problem)

Zusammenfassend werden in dieser Arbeit Anforderungen zerlegt und verschiedene Lösungsansätze für die Entwicklung von FTS untersucht und gegenübergestellt [Tre-2019]. Ein gesamtheitliches Vorgehen für die Implementierung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich wird hingegen nicht betrachtet. Einzelne Anforderungen weisen Parallelen zu autonomen mobilen Robotern im Outdoor-Bereich auf, müssen aber um zusätzliche Anforderungen für den Autonomiegrad und Outdoor-Einsatz ergänzt werden.

Die soeben beschriebenen Ansätze aus der Forschung und Wissenschaft, die Eigenschaften der involvierten Teilgebiete (Abschnitt 2.1) sowie die Diskussion bestehender Modelle und Methoden (Abschnitt 2.2) unterstreichen die zu Beginn dieser Forschungsarbeit aufgestellte Hypothese eines Defizits bei der gesamtheitlichen Betrachtung der vier Teilgebiete Outdoor-Anwendungen, FTS, selbstfahrende Kraftfahrzeuge und autonome Systeme. Demnach stellt die Betrachtung und Untersuchung der genannten Teilgebiete sowie das daraus ableitende Vorgehen für die Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände eine Lücke in der aktuellen Forschung und Wissenschaft dar. Um diese Forschungslücke zu schließen, wird in der vorliegenden Arbeit ein Vorgehensmodell zur Flexibilisierung und Verbesserung der Transporte auf dem Werksgelände durch die Implementierung autonomer mobiler Roboter entwickelt. Das strukturelle Vorgehen für die Implementierung basiert auf dem V-Modell XT unter Berücksichtigung der Axiomatic Design Methode für die Definition und Zerlegung funktionaler Anforderungen und deren Gestaltungsparametern.

Zur Einordnung und Abgrenzung des Forschungsbedarfs ist – auf Basis eines morphologischen Kastens in der nachfolgenden Tabelle 2-5 – der für diese Arbeit relevante Betrachtungsbereich abgebildet.

Tabelle 2-5: Einordnung und Abgrenzung des Forschungsbedarfs

	Parameter	Ausprägung						
Anwendung	Bereich	Indoor	Outdoor	Transit				
	Funktion	Beschaffungslogistik	Distributionslogistik	Entsorgungslogistik	Intralogistik			
	Umgebung	Bergbau	Flughafen	Fracht- und Verteilzentren	Landwirtschaft	Seehafen	Werk	Öffentlicher Raum
Roboter	Aufgabe	Handhaben	Kommissionieren	Lagern	Transportieren	Verpacken		
	Typ	Humanoide Roboter	Laufroboter	Mobile Roboter	Portalroboter	Stationäre Roboter		
	Verhalten	Nicht automatisiert	Assistiert	Teil-automatisiert	Bedingt automatisiert	Hoch-automatisiert	Autonom	
	Verwendungszweck	Forschung	Industrie	Service				
Vorgehen	Phasenbezogene Vorgehensmodelle	Wasserfallmodell	V-Modell	V-Modell XT	Spiralmodell	Inkrementelles Vorgehen	Prototyping	Agiles Vorgehensmodell
	Designtheorien -und methoden	Axiomatic Design	Design Decision-Making Methods	DFX	DSM	FMEA	QFD	Pugh-Method
	Grafische Modellierungssprachen	BPMN	EPK					

Die Einordnung gliedert sich in drei Blöcke: Anwendung, Roboter und Vorgehen. Innerhalb der Anwendung liegt der Fokus dieser Arbeit auf dem Outdoor-Bereich. Der Transitbereich bildet zwar nicht den Schwerpunkt der Betrachtung, fließt aber sehr wohl mit ein, da in einigen Fällen Transporte, die außerhalb der Hallen stattfinden, innerhalb der Hallen be- oder entladen werden. Des Weiteren wird die Intralogistik, die sowohl einen Bereich der Beschaffungs- als auch der Distributionslogistik auf dem Werksgelände darstellt, betrachtet. Hierzu zählen auch die Entsorgungsprozesse, welche auf dem Werksgelände stattfinden. Die Grenzen des Werksgeländes stellen somit die Grenzen des Betrachtungsbereichs dieser Forschungsarbeit dar. Es werden jedoch auch Potenziale für die Anwendung des entwickelten Vorgehensmodells auf weitere Bereiche und Industrien, wie den öffentlichen Straßenverkehr oder Flughäfen aufgezeigt.

Im zweiten Block liegt der Fokus auf mobilen Robotern, die Waren und Materialien im Industrieumfeld handhaben und transportieren. Beim Verhalten der Roboter wird vor allem der Autonomiegrad beleuchtet. An dieser Stelle sollen zudem eine kritische Betrachtung sowie entsprechende Handlungsempfehlungen für den optimal einzusetzenden Autonomiegrad eines Roboters diskutiert werden.

Der dritte Block zeigt die zu verwendenden Modelle und Methoden, die letztendlich in das Vorgehensmodell mit einfließen. Für die Prozessanalyse im nachfolgenden Kapitel 3 wird die grafische Modellierungssprache BPMN verwendet. Ein essenzieller Bestandteil dieser Forschungsarbeit ist die Anwendung der Axiomatic Design Methode. Sie wird einen Großteil des Vorgehensmodells ausmachen. Das gesamte Vorgehen

orientiert sich am V-Modell XT. Abbildung 2-10 zeigt die Vorgehensweise angelehnt an die ISO26262 [ISO-26262-1].

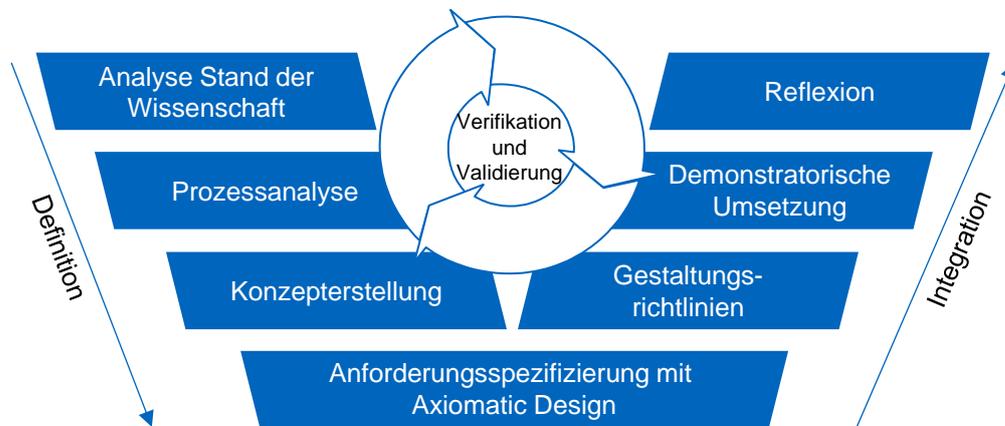


Abbildung 2-10: Vorgehen nach dem V-Modell XT für die Entwicklung des Vorgehensmodells

Die Prozessanalyse sowie die demonstratorische Umsetzung des Vorgehensmodells werden exemplarisch bei BMW durchgeführt und anschließend validiert.

2.3.2 Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, den Planungsprozess für den Einsatz von autonomen mobilen Robotern auf dem Werksgelände zu unterstützen und bei der Beantwortung folgender übergeordneter Frage zu helfen:

Wie lassen sich autonome mobile Roboter auf dem Werksgelände vor dem Hintergrund der Flexibilisierung und Verbesserung der Transporte und unter Berücksichtigung der prozessualen, technischen, sicherheits- und steuerungsspezifischen sowie wirtschaftlichen Aspekte implementieren?

Die wissenschaftliche Herausforderung liegt hierbei insbesondere in der Vielzahl an Kunden/Stakeholdern, zusätzlichen Anforderungen und Rahmenbedingungen, der zum Teil noch wenig etablierten Technik, der fehlenden Erfahrungen sowie gleichzeitig der Vielzahl an Gestaltungsoptionen. Demzufolge wird ein Vorgehensmodell entwickelt, mit dem ein einheitliches und strukturiertes Vorgehen bei der Implementierung robuster und autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich möglich ist. Mithilfe der innerhalb des Vorgehensmodells angewandten Axiomatic Design Methode werden systematisch funktionale Anforderungen und dazugehörige funktionale Metriken sowie deren Lösungsparameter basierend auf Kundenwünschen gesucht und zugeordnet. Infolgedessen liefert das Vorgehensmodell einen wissenschaftlichen Beitrag in Form

identifizierter Bausteine, welche in das Vorgehensmodell einfließen sowie den Entscheidungswegen, welche zur Auswahl dieser Bausteine geführt haben. Damit dieses Vorgehensmodell verwertbar für die praktische Anwendung ist, werden als Ergebnis Gestaltungsrichtlinien für die Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände abgeleitet. Die Gestaltungsrichtlinien stellen ein einheitliches Vorgehen für die Praxis dar und beinhalten sowohl die Anforderungen der Hersteller als auch der Anwender von AMRs. Abschließend werden mithilfe der entwickelten Automatisierungsmatrix im Rahmen dieser Forschungsarbeit Handlungsempfehlungen für den Autonomiegrad von mobilen Robotern gegeben.

Das Vorgehensmodell und die daraus entstehenden Gestaltungsrichtlinien sollen somit Antworten auf die nachfolgenden Teilforschungsfragen im Rahmen der Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände liefern:

- **Welche Prozessschritte** auf dem Werksgelände können durch den Einsatz autonomer mobiler Roboter verbessert werden und wie können diese **Potenziale systematisch identifiziert** werden?
- Welchen **Einfluss haben autonome mobile Roboter im Outdoor-Bereich** auf zukünftige Transporte auf dem Werksgelände hinsichtlich Flexibilität, Effizienz und Infrastruktur?
- **Wie sollten autonome mobile Roboter** unter Berücksichtigung der spezifischen Rahmenbedingungen (z. B. Outdoor-Fähigkeit und Arbeitssicherheit) **gestaltet** werden?
- Wie können **autonome mobile Roboter in bestehende Strukturen und Prozesse integriert** werden?

3 Prozessanalyse von Transporten auf dem Werksgelände am Beispiel eines Automobilherstellers

3.1 Gegenstand der Analyse – Das BMW-Werk München

Die Prozessanalyse von Transporten auf dem Werksgelände wird exemplarisch am BMW-Werk München durchgeführt und dient als Basis für die Anforderungsspezifizierung. Das Werk in München erfüllt die zuvor beschriebenen Ausgangskriterien hinsichtlich Bereich, Funktion und Umgebung. Zudem weist es besonders komplexe Strukturen auf, beinhaltet diverse Prozesse im Outdoor-Bereich mit unterschiedlichen Behälterttypen und benötigt einen besonders hohen Grad an Flexibilität. Aus diesen Gründen eignet sich das BMW-Werk München besonders gut für die Durchführung der Prozessanalyse.

Das BMW-Werk in München ist das erste und älteste Produktionswerk von BMW. Es wurde im Jahr 1922 in Betrieb genommen. Zunächst sind dort Flugzeugmotoren und Motorräder produziert worden. Erst im Jahr 1952 begann die Produktion von Automobilen. Zur damaligen Zeit lag das Werk am Stadtrand. Bedingt durch die Expansion der Stadt München befindet es sich nun innerhalb der Stadt und ist demzufolge flächenmäßig stark begrenzt.

Der Motorenbau ist das Herzstück des Werks, rundherum befindet sich die Fahrzeugproduktion. Es handelt sich bei dem Werk um ein „*Brownfield*“⁹. Aufgrund seiner gewachsenen Strukturen stößt es an die Grenzen der umliegenden Wohngebiete [fml-2020b, S. 35f.]. Derzeit werden im Werk München täglich ca. 1.000 Automobile produziert und über 3.000 Motoren gebaut. Um diese Stückzahlen bewältigen zu können, werden täglich rund 1,3 Millionen Teile in ca. 9.000 Behältern angeliefert. Die Anlieferung erfolgt primär durch LKW sowie teilweise auch mit Zügen. Die LKW werden entweder in Kalthallen, unter dem Vordach oder im Freien abgefertigt. Innerhalb des Werks werden die Behälter mithilfe von Staplern, Schleppern oder werksinternen Zugmaschinen an die jeweiligen Verbauorte oder Lager transportiert. Die Auslieferung der Fertigfahrzeuge wird zu 60 % über die Schiene und zu 40 % über LKW abgewickelt [BMW-2018a]. Eine detaillierte Darstellung des Werkslayouts sowie die Identifikation und Beschreibung von Transportprozessen im Outdoor-Bereich erfolgen im nachfolgenden Abschnitt.

⁹ „Brownfield“ ist ein Begriff aus der Werkstruktur- und Fabriklayoutplanung und bezeichnet den Umbau bestehender Strukturen. Das Gegenteil von „Brownfield“ ist „Greenfield“ [Klu-2018, S. 3ff.].

3.2 Ist-Analyse von Transportprozessen auf dem Werksgelände

Die Ist-Analyse stellt einen Teil der Grundlagenermittlung bei der Planung technischer Logistiksysteme dar und umfasst die Untersuchung des gesamten Materialflusses. Ihr Ziel ist es, Verbesserungspotenziale aufzudecken und Schwachstellen zu identifizieren [Bun-2018, S. 84]. Mithilfe der Aufnahme des aktuellen Stands am Beispiel des BMW-Werks München und der anschließenden Definition von Referenzprozessbausteinen wird die Basis für die Konzeption und die Anforderungsspezifizierung des Vorgehensmodells gelegt. Um die Transportprozesse auf dem Werksgelände zu ermitteln, wird üblicherweise wie in Abbildung 3-1 dargestellt vorgegangen.



Abbildung 3-1: Vorgehensweise der Ist-Analyse

Im ersten Schritt wird das Layout erfasst. Ein detailliertes Werkslayout ermöglicht die Einordnung der Struktur und verschafft einen ersten Überblick. Es folgt die Identifikation der Prozesse im Outdoor-Bereich. Nachfolgend werden alle relevanten Informationen und Daten über die einzelnen Prozesse gesammelt, erläutert und zusammengefasst. Hierzu zählen unter anderem die Transportstrecke, das Transportgut, der Ladungsträger sowie das Transportfahrzeug. Mithilfe der Modellierungssprache BPMN werden die Prozesse grafisch visualisiert. Eine Beurteilung der identifizierten Outdoor-Transportprozesse schließt die Analyse ab.

3.2.1 Layouterfassung

Das Layout eines Werks hat einen signifikanten Einfluss auf die Transportprozesse. So können je nach Struktur des Werks unterschiedliche Prozesse außerhalb der Hallen stattfinden. Die Werkstruktur- und Fabrikplanung kann dazu beitragen, Entfernungen und Komplexität dieser Transportprozesse zu reduzieren, beispielsweise durch die Optimierung von Transportstrecken [Paw-2014, S. 17ff.]. Abbildung 3-2 zeigt drei typische Formen von Werksstrukturen in einem Automobilwerk.

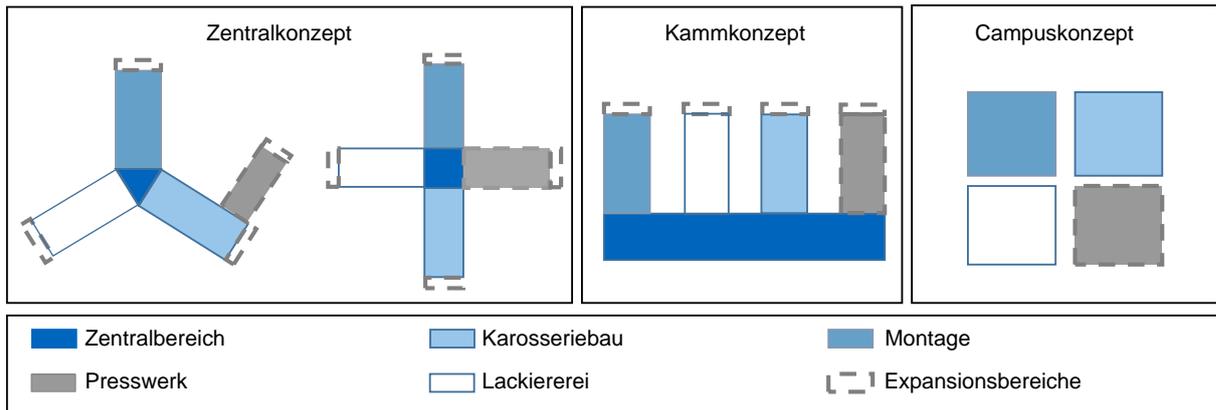


Abbildung 3-2: Typische Formen eines Automobilwerks [Mau-2001, S. 11]

Beim Zentralkonzept sind die einzelnen Fertigungsbereiche stern- oder kreuzförmig um einen zentralen Bereich angeordnet, dieser dient als Drehscheibe. Die Fertigungsbereiche sind räumlich konzentriert. Das Zentralkonzept kommt insbesondere bei der Neuplanung von Werken („Greenfield-Planung“) zum Einsatz. Sind die Fertigungsbereiche parallel angeordnet, so handelt es sich um ein Kammkonzept. Der Zentralbereich erstreckt sich über alle Bereiche und verbindet diese miteinander. Das Campuskonzept besteht aus räumlich getrennten Funktionsbereichen. Die über Jahrzehnte gewachsenen Strukturen bilden kein geschlossenes Gesamtkonzept und sind häufig bei älteren Werken vorzufinden [Klu-2018, S. 3ff.] [Mau-2001, S. 11]. Durch die über die Jahre gewachsenen Strukturen entspricht das BMW-Werk München am ehesten einem Campuskonzept. Die teilweise weit voneinander entfernten Fertigungsbereiche erfordern lange Transportwege [fml-2020b, S. 7f.]. Die Aufgabe der Planung ist es jedoch, die Transportwege so kurz wie möglich zu halten, um Zeit und Kosten zu minimieren [Sch-2014a, S. 323].

Die Basis für das weitere Vorgehen der Ist-Analyse bildet das Layout des BMW-Werks München mit den farblich markierten Fertigungsbereichen, welche der nachfolgenden Abbildung 3-3 zu entnehmen ist. Die Bereiche unterteilen sich in den Motorenbau, der aus historischen Gründen einen Großteil der Fläche einnimmt, das Presswerk, den Karosseriebau, die Lackiererei, die Montage sowie die Sitzfertigung und Entsorgung.

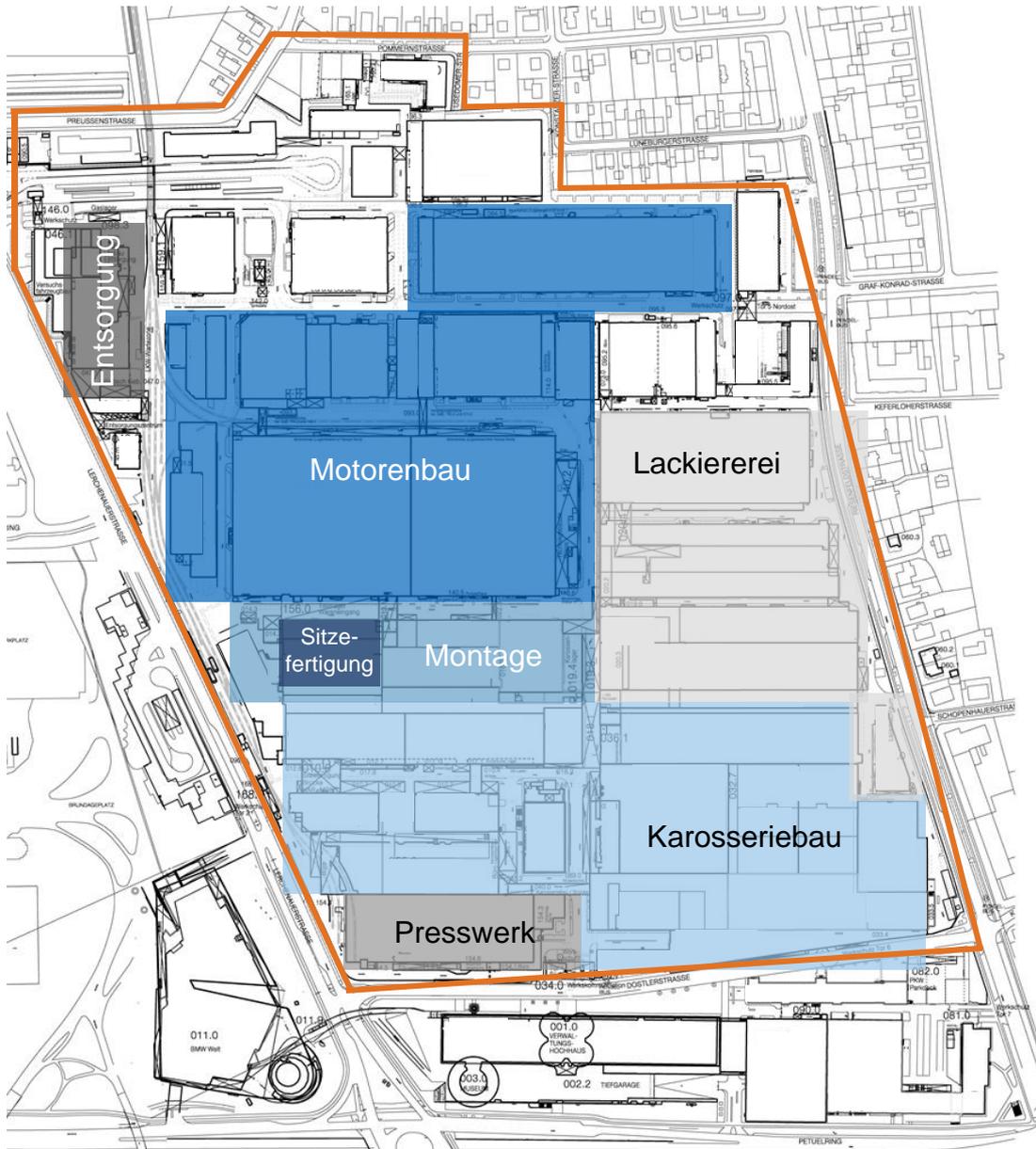


Abbildung 3-3: Layout des BMW-Werks München mit den gekennzeichneten Fertigungsbereichen

3.2.2 Prozessidentifikation

Um die gewünschten Prozesse im Outdoor-Bereich auf dem Werksgelände identifizieren zu können, ist es zunächst hilfreich, den Materialfluss in einem Automobilwerk aufzuzeigen.

Der Materialfluss eines Automobilwerks

Ein klassischer Materialfluss eines Automobilwerks, wie er in Abbildung 3-4 dargestellt ist, beginnt mit dem Wareneingang, hier wird unter anderem Stahl in Form von Coils oder Stahlplatten in das Presswerk geliefert. Daraufhin werden Stahlbleche für die Karosserie des Fahrzeugs gepresst. Anschließend gelangen die gepressten Stahlbleche, mit zusätzlichen von Lieferanten angelieferten Bauteilen, in den Karosseriebau.

Aus Einzelteilen und vorgefertigten Baugruppen wird die Karosserie zusammengesweißt. Die Rohkarossen werden mithilfe von Fördertechnik weiter zur Lackiererei transportiert. Nach der Reinigung der Karossen werden der Grund- und Decklack sowie der Unterbodenschutz aufgebracht. Zum Trocknen gelangen die Karossen in den Karossenspeicher und werden anschließend nach gleicher Farbe zu Blöcken zusammengefasst und lackiert. Es folgt die Montage weiterer Teile, Baugruppen und Module sowie der Einbau des Motors und Antriebstrangs. Abschließend gelangt das Fertigfahrzeug in die Qualitätsprüfung [Ihm-2006, S. 9ff.].

Der beschriebene Materialfluss stellt den Hauptmaterialfluss eines Automobilwerks dar. Die einzelnen Fertigungsbereiche werden durch Fördertechnik, welche sich im Innen- oder Außenbereich, in Tunneln oder auf überdachten Brücken befinden, miteinander verbunden. Nur in vereinzelt Fällen, wie etwa Baustellen, wird der Hauptmaterialfluss durch z. B. LKW-Transporte abgewickelt.

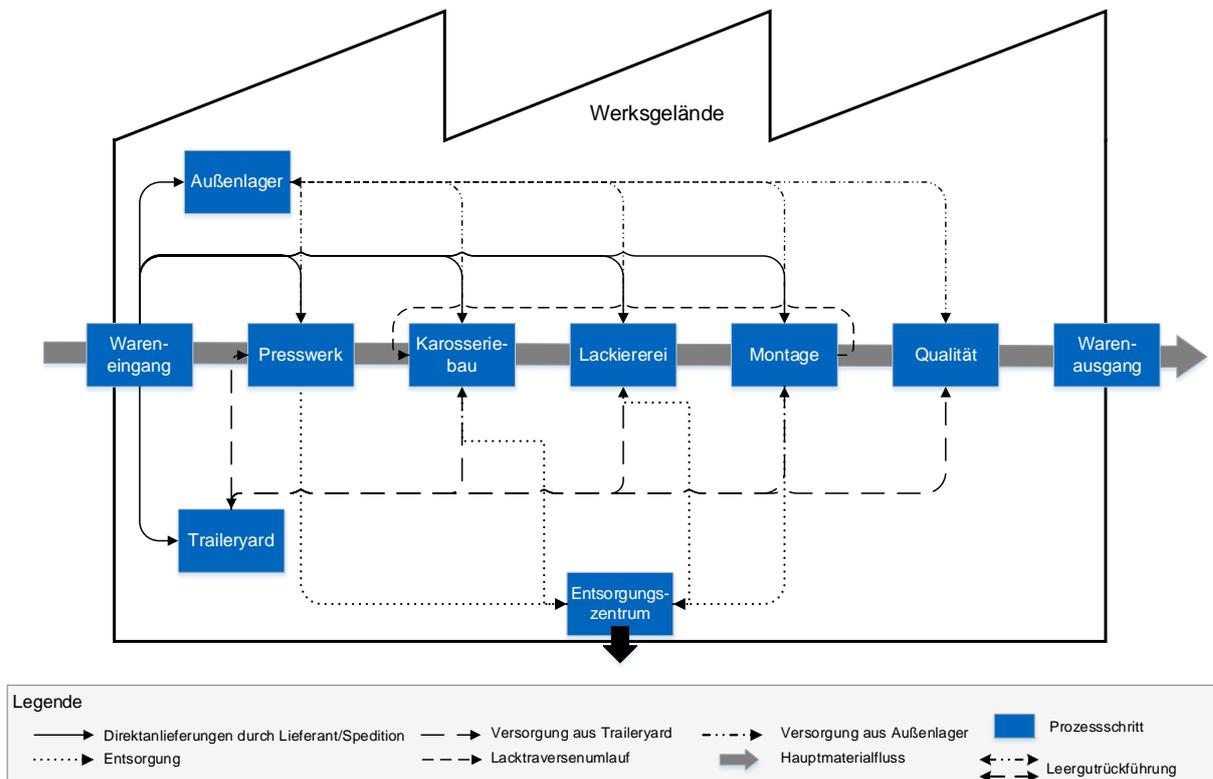


Abbildung 3-4: Innerbetriebliche Transportprozesse im Outdoor-Bereich auf dem Werksgelände eines Automobilherstellers

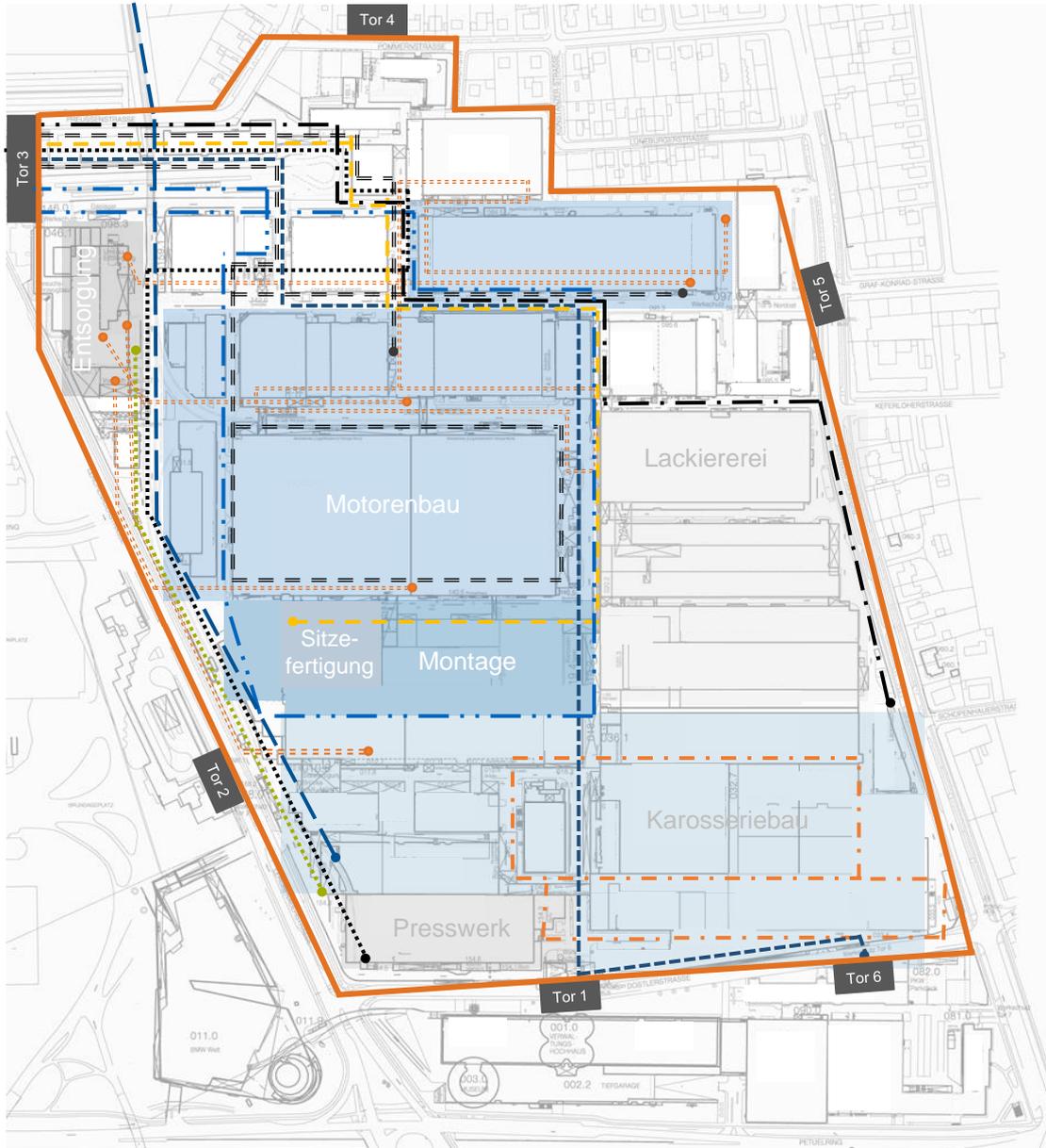
Zu den Materialtransporten außerhalb der Hallen zählen beispielsweise der Transport von Bauteilen, Baugruppen oder Modulen, die aus Lagern, welche sich auf dem Werksgelände befinden, an die jeweiligen Bereiche geliefert werden. Lager befinden sich nicht immer oder nur teilweise direkt auf dem Werksgelände des Automobilher-

stellers. Größere Versorgungszentren liegen oftmals in direkter Nähe zum Automobilwerk, jedoch nicht auf dessen Produktionsgelände. Ähnlich verhält es sich mit Trailer Yards, die einen Umschlagsort für Sattelaufleger, Container oder offene Auflieger darstellen. Zum Teil verfügen Automobilhersteller direkt auf dem Werksgelände über einen internen Trailer Yard, bei anderen Herstellern befindet sich dieser hingegen gleich vor den Werkstoren oder in direkter räumlicher Nähe. Aus den Trailer Yards werden die einzelnen Fertigungsbereiche mit Bauteilen versorgt. Sowohl bei der Bewirtschaftung der Yards als auch der Außenlager finden Leergutrückführungsprozesse statt. Dadurch bleiben die Behälter im ständigen Umlauf. Das Leergut sowie herkömmliche Anlieferungen werden entweder in ein Lager innerhalb oder außerhalb des Werksgeländes oder auf einem Trailer Yard abgestellt. In beiden Fällen kann ein Vollgut-Leergutwechsel stattfinden, je nachdem, welchen Auftrag der Lieferant erhält. Häufig jedoch werden die leeren Behälter vom Lieferanten wieder mitgenommen, um erneut befüllt zu werden.

Abfall und Schrott, welche als Ausschuss in den einzelnen Fertigungsbereichen entstehen, werden im Entsorgungszentrum gebündelt, verwertet und abtransportiert. Auch dieser Prozess stellt einen typischen Outdoor-Transportprozess dar. Vereinzelt werden Abfall und Schrott auch über Fördertechnik innerhalb der Hallen oder Tunnel abtransportiert.

Als weiterer Transportprozess ist der Lacktraversentransport zu erwähnen. Zwischen Montage und Karosseriebau sind Lacktraversen im Umlauf, welche für die Halterung der Karossen benötigt werden. Der Transport erfolgt in den meisten Fällen über Elektroschlepper mit Trailern (Trailerzüge) oder LKW. Neben den erwähnten Standardprozessen finden auch viele weitere werksspezifische Transportprozesse im Outdoor-Bereich statt.

Mithilfe der Erläuterung des Materialflusses eines Automobilwerks im Allgemeinen sind die wesentlichen Prozessschritte und Transportprozesse im Outdoor-Bereich aufgezeigt worden. Neben der allgemeinen Darstellung werden nun die spezifischen Outdoor-Transportprozesse des BMW-Werks München identifiziert. Hierbei werden systematisch alle Fertigungsbereiche abgearbeitet und mithilfe von Prozessbeschreibungen mit den Prozessverantwortlichen Outdoor-Transportprozesse eruiert. Abbildung 3-5 zeigt diese Prozesse.



Legende			
.....	Direktanlieferung Presswerk	— — — — —	Direktanlieferung Sitzfertigung
— — — — —	Entsorgung Presswerk – Stahl	— · — · —	Direktanlieferung Montage
· · · · ·	Entsorgung Presswerk – Aluminium	· · · · ·	Entsorgungsprozess Montage, Motorenbau und Sitzfertigung
— — — — —	Direktanlieferung Karosseriebau	— = — = —	Direktanlieferung Motorenbau
— · — · —	Versorgung Karosseriebau	●	Be- und Entladung von Aufliegern
— · — · —	Direktanlieferung Lackiererei		

Abbildung 3-5: Identifizierte Outdoor-Transportprozesse im BMW-Werk München

3.2.3 Prozessbeschreibung und -visualisierung

Wie aus der Prozessidentifikation hervorgeht, wurden die folgenden zehn Outdoor-Transportprozesse im BMW-Werk München identifiziert:

- a) Direktanlieferung Presswerk
- b) Entsorgung Presswerk – Stahl
- c) Entsorgung Presswerk – Aluminium
- d) Direktanlieferung Karosseriebau
- e) Versorgung Karosseriebau
- f) Direktanlieferung Lackiererei
- g) Direktanlieferung Sitzfertigung
- h) Direktanlieferung Montage
- i) Entsorgungsprozess Montage, Motorenbau und Sitzfertigung
- j) Direktanlieferung Motorenbau

Die Darstellung der Outdoor-Transportprozesse erfolgt mithilfe der grafischen Modellierungssprache BPMN. Exemplarisch ist für den Prozess a) das dazugehörige BPMN Diagramm im nachfolgenden Abschnitt aufgeführt. Alle weiteren BPMN Diagramme sind dem Anhang A.1 zu entnehmen. Die einzelnen Prozessbeschreibungen sind an die jeweiligen Fertigungsbereiche angelehnt und wurden gemeinsam mit dem Prozessverantwortlichen im BMW-Werk München durchgeführt.

a) Direktanlieferung Presswerk

Stahlplatinen, die in Sonderladungsträgern (SLT) transportiert und von anderen BMW-Standorten durch eine Sattelzugmaschine mit speziellen Planenaufliegern angeliefert werden, gelangen über das Werkstor 3 in das Werk München. Täglich werden rund 32.000 Karosserieteile produziert. Von den Karosserieteilen, die täglich gepresst werden, werden nur der Seitenrahmen und die Frontklappe des Autos in einem internen Lager aufbewahrt. Die SLT werden entweder beim Entladeplatz 1 mit einem 8 t-Stapler unter einem Vordach oder bei Stellplatz 2 innerhalb der Halle von einem Kran entladen. Dieser hebt die Stahlplatinen von oben aus dem Auflieger heraus. Im Zuge der Entladung werden die Auflieger teilweise auch wieder mit Leergut (Platinenrahmen) beladen. Die Sattelzüge haben ein fest vorgegebenes Zeitfenster von 30 Minuten und verkehren im Zweischichtbetrieb. Die Transportstrecke innerhalb des Werks bis zum ersten Entladeplatz beläuft sich auf ca. 800 m, bis zum zweiten Entladeplatz auf rund 850 m. Abbildung 3-6 zeigt die Prozessvisualisierung anhand von BPMN.

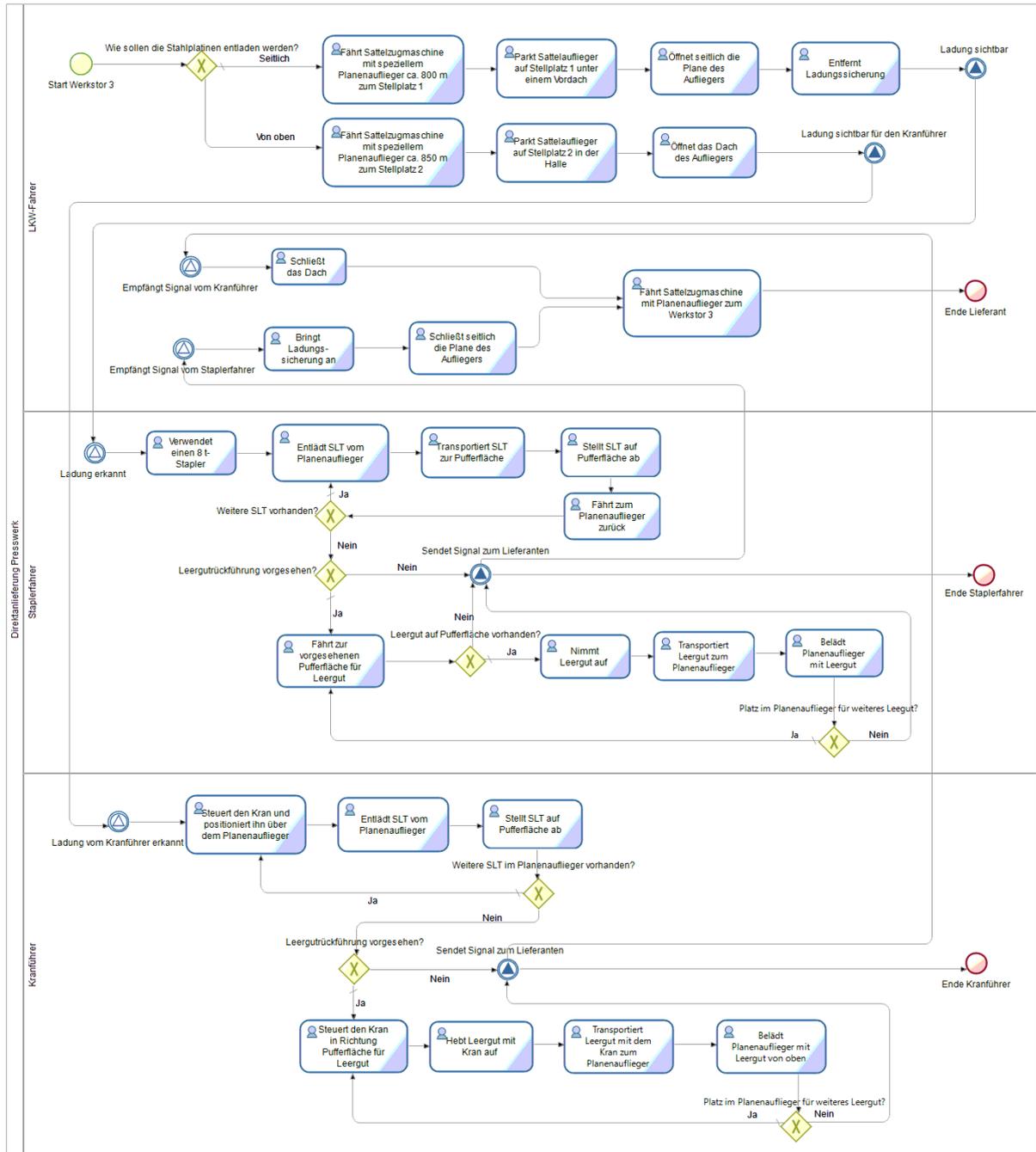


Abbildung 3-6: BPMN Diagramm – a) Direktanlieferung Presswerk

b) Entsorgung Presswerk – Stahl

Der Stahlschrott aus dem Presswerk wird zu Würfeln pakettiert und automatisch in Waggons gekippt. Die Waggons befinden sich in einer Kalthalle. Sind die Waggons voll, werden sie mit einer Lokomotive über die Schiene aus dem Werk zu einem Entsorgungszentrum transportiert.

c) Entsorgung Presswerk – Aluminium

Der Entsorgungsprozess des Aluschrotts im Presswerk erfolgt mithilfe eines Elektroschleppers mit Planentrailern (Trailerzug). Der Entsorgungsprozess folgt keinem festen Takt. Sind die Planentrailer voll, fährt der Trailerzug zu einem internen Entsorgungszentrum. Die Strecke beläuft sich auf ca. 850 m. Das Beladen im Presswerk wird von einem 8 t-Stapler innerhalb der Halle übernommen. Das Entladen im Entsorgungszentrum erfolgt im Outdoor-Bereich mithilfe eines Greifkrans.

d) Direktanlieferung Karosseriebau

Rund 400 Pressteile aus verschiedenen Stahlsorten und unterschiedlichen Blechdicken werden benötigt, um ein Auto zu formen. Im Karosseriebau werden all diese Teile miteinander verbunden, um eine sogenannte "*Rohkarosse*" für die Lackierung herzustellen. Die Press- und Blechteile kommen zum einen direkt aus dem Presswerk und zum anderen von Lieferanten sowie anderen BMW-Standorten. Zugmaschinen mit Tiefladeaufliegern¹⁰ (Megatrailer) fahren vom Werkstor 3 vier Stellplätze beim Karosseriebau an. Davon befinden sich drei unter einem Vordach und einer in einer Kalthalle. Der Sattelzug¹¹, welcher den Stellplatz in der Kalthalle anfährt, verlässt das Werk über Tor 6. Alle anderen Sattelzüge fahren eine Schleife und verlassen das Werksgelände wieder über Tor 3. Die Distanz zu den ersten drei Stellplätzen liegt bei rund 800 m, wobei die des letzten Stellplatzes bei 1.100 m liegt. Die Anlieferungen erfolgen in fest vorgegebenen Zeitfenstern von 30 Minuten im Zweischichtbetrieb. Bei der Aufliegerart handelt es sich um Megatrailer, welche SLT beinhalten. Die SLT werden mit einem 4,5 t-Stapler unter einem Vordach entladen und anschließend mit Leergut wieder beladen.

e) Versorgung Karosseriebau

Die Versorgung des Karosseriebaus mit Vollgut sowie das Einsammeln von Leergut erfolgt über drei Fahrwege durch Trailerzüge. Die Trailerzüge fahren unterschiedliche Bahnhöfe im Karosseriebau an. Einige der Bahnhöfe befinden sich innerhalb, andere außerhalb der Hallen. Be- und Entladen werden die Trailerzüge von 4,5 t-Staplern. Die Kommunikation zwischen Trailerzug- und Staplerfahrer erfolgt durch ein akustisches Signal (Hupen des Trailerzugfahrers). Ein Planentrailer kann maximal mit 4 t Last beladen werden. Die Maximalgeschwindigkeit für Trailerzüge beträgt im Werk München im Außenbereich 10 km/h. Die Fahrten finden auf allen drei Strecken im Zweischichtbetrieb statt. Versorgungsprozess 1 erstreckt sich über ca. 720 m, Versorgungsprozess 2 über ca. 790 m und Prozess 3 über knapp 1.500 m. Alle drei Strecken werden im Uhrzeigersinn abgefahren.

¹⁰ Tiefladeauflieger (Megatrailer) besitzen im Vergleich zu Standradaufliegern eine Innenhöhe von 3 m.

¹¹ Als Sattelzug wird das Gespann aus Sattelzugmaschine und Auflieger bezeichnet [Fer-2014, S. 327].

f) Direktanlieferung Lackiererei

Durch Direktanlieferungen vom Lieferanten werden Chemikalien und Lacke mit Sattelzugmaschinen und Planenauflegern, welche SLT beinhalten, zur Lackiererei geliefert und dort von zwei 3,5 t-Staplern entladen. Die Strecke vom Werkstor 3 bis zur Entladestelle beträgt rund 1.200 m. Die Entladeprozesse unterliegen keinen festen Zeiten. Die Stapler platzieren die Landungsträger in einem Wartebereich, ab dort übernimmt ein explosionsgeschützter Stapler. Dieser muss durch eine Schleuse, die ihn von Staub und Schmutz befreit. Die Stapler, welche im Outdoor-Bereich den Planenaufleger entladen, dürfen nicht innerhalb der Lackiererei fahren. Die Chemikalien werden in Intermediate Bulk Containern (IBC) aus Stahl und Kunststoff mit 1.000 l Fassungsvermögen transportiert. Die Lacke sind in reguläre Lacke und Sonderlacke unterteilt und werden in Fässern auf Europaletten gebündelt. Die Lackiererei verfügt über zwei Lagerhallen. Eine davon ist für die Aufbewahrung der Chemikalien und regulären Lacke bestimmt, die andere für die Sonderlacke. Da es sich beim Leergut der Chemikalien und Lacke um Sonderabfälle handelt, werden diese separat von einem Lieferanten abgeholt. Interne Leergut- und Entsorgungsprozesse finden nicht statt.

g) Direktanlieferung Sitzfertigung

Innerhalb der Montage befindet sich die Sitzfertigung. Auch hierfür werden Materialien in Form von SLT und Universalladungsträgern (ULT) von Lieferanten und Versorgungszentren angeliefert. Die Sattelzüge fahren vom Werkstor 3 bis zum Stellplatz ca. 500 m. Hierbei handelt es sich um Sattelzugmaschinen mit Megatrailern. Auf einem Stellplatz unter einem Vordach werden die Sattelzüge von einem 3,5 t-Stapler entladen und mit Leergut wieder beladen.¹² Täglich werden 18 Sattelzüge abgefertigt. Die Be- und Entladedauer eines Sattelzugs beträgt ca. 30 Minuten.

h) Direktanlieferung Montage

Der Montagebereich empfängt täglich etwa 300 Sattelzüge, die ab 6 Uhr bis 23:30 Uhr die Montage beliefern. Zudem verfügt die Montage über 18 Stellplätze für Sattelaufleger und acht Stellplätze für Wechselbrücken, die sich zum Teil unter Vordächern, in Kalthallen und im Freien befinden. Maximal halten die Sattelzüge 30 Minuten auf den Stellplätzen. Für das Entladen der SLT und ULT und anschließende Beladen mit Leergut stehen ein 2,5 t-, 19 3,5 t-, ein 4,5 t- und ein 8 t-Stapler zur Verfügung. Die Wahl des Staplers richtet sich nach dem Gewicht der SLT und ULT. Der Großteil der Aufleger (Planenaufleger und Megatrailer) enthält Mischware. Sechs der 26 Stellplätze werden ausschließlich von Sattelzügen mit sortenreiner Ladung (Sequenzbehälter mit identischen Maßen) angefahren. Ein Beispiel hierfür ist die Abgasanlage. Sie wird mit sequenzierten SLT beliefert, die von 3,5 t-Staplern entladen werden.

¹² Je nach Bedarf auch drei 3,5 t-Stapler.

i) Entsorgungsprozess Montage, Motorenbau und Sitzfertigung

Aufgrund der großen Menge an Abfällen und Schrott, die in den Bereichen Fahrzeugmontage, Motorenbau und Sitzfertigung anfallen, werden gesonderte Entsorgungsprozesse durch einen Dienstleister abgewickelt. Für diese Prozesse werden Trailerzüge eingesetzt. Die Trailerzüge fahren vier Strecken ab und sammeln dabei den Abfall und Schrott der Montage, des Motorenbaus und der Sitzfertigung ein. Sie fahren rund sieben Mal pro Tag, je nach Bedarf auch öfter, jedoch ohne einen festgelegten Fahrplan. An den Haltestellen belädt ein 3,5 t-Stapler die Planentrailer mit ULT. Er kommt, sobald der Trailerzugfahrer ihm ein Signal sendet. Im Entsorgungszentrum stehen vier 2,5 t-Stapler und ein 5 t-Stapler für die Entladung der Planentrailer bereit.

j) Direktanlieferung Motorenbau

Über das Tor 3 im Norden des Werks liefern Sattelzugmaschinen mit Megatrailern Bauteile und Materialien in SLT und ULT für den Motorenbau an. Die Sattelzüge fahren zu neun festen Stellplätzen im Motorenbau. Die Stellplätze befinden sich unter Vordächern, in Kalthallen und in einem Fall innerhalb einer Halle, wo ein Aufzug den Sattelzug in den zweiten Stock des Gebäudes befördert. Entladen werden die Megatrailer seitlich von 3,5 t-Staplern. Diese beladen die Megatrailer außerdem mit Leergut. Ebenfalls ist ein Trailerzug vor Ort, der die Ladungsträger im gesamten Motorenbau verteilt. Die Anlieferung erfolgt zu festen Zeiten.

3.2.4 Prozessbeurteilung

Die dargestellten Transportprozesse weisen unterschiedliches Automatisierungspotenzial auf. Einige Prozesse sind komplexer als andere, insbesondere hinsichtlich der Umgebung und des Prozessablaufs. Um die Stärken und Schwächen der Prozesse in Bezug auf die Automatisierbarkeit aufzuzeigen und auf Basis dessen eine Beurteilung durchführen zu können, wird in dieser Forschungsarbeit die SWOT-Analyse angewandt. Diese setzt sich aus den Stärken (*engl. Strengths*), Schwächen (*engl. Weaknesses*), Chancen (*engl. Opportunities*) und Risiken (*engl. Risks*) zusammen [Sun-2019].

Für jeden einzelnen zuvor beschriebenen und visualisierten Outdoor-Transportprozess ist eine SWOT-Analyse gemeinsam mit den Prozessverantwortlichen des BMW-Werks München durchgeführt worden. Abbildung 3-7 zeigt exemplarisch die SWOT-Analyse für den Transportprozess a). Alle weiteren Analysen sind dem Anhang A.2 zu entnehmen.

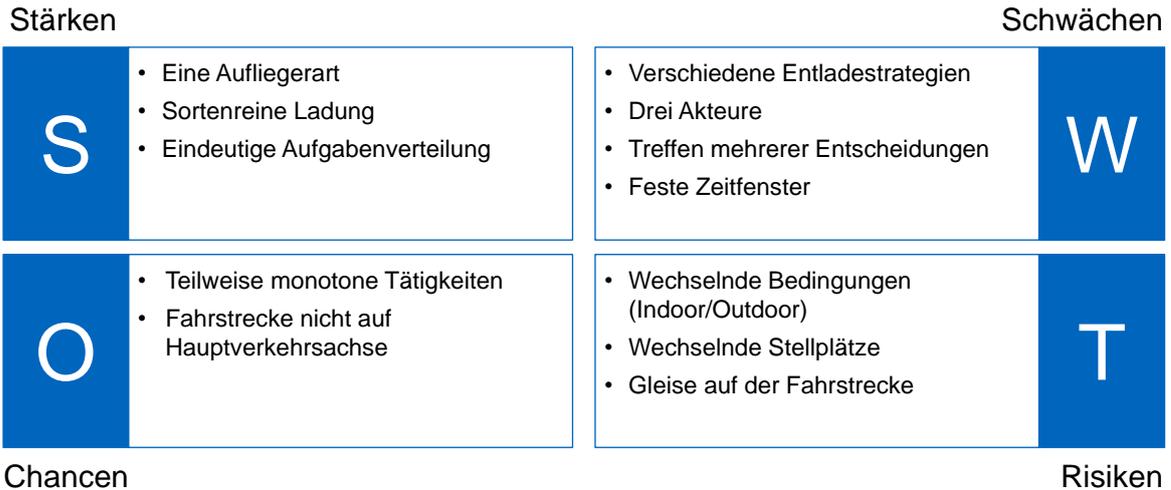


Abbildung 3-7: SWOT-Analyse – a) Direktanlieferung Presswerk

Zusammenfassend stellt Tabelle 3-1 die zehn SWOT-Analysen in einer Beurteilungsmatrix dar. Die Beurteilungskriterien ergeben sich aus den Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der einzelnen Outdoor-Transportprozesse (vgl. Anhang A.2).

Tabelle 3-1: Beurteilungsmatrix identifizierter Outdoor-Transportprozesse im BMW-Werk München

		Beurteilungskriterien																		
		Umgebungskomplexität								Prozesskomplexität										
		Hohes Verkehrsaufkommen	Fahrstrecke auf Hauptverkehrsachse	Gleise auf der Fahrstrecke	Verschiedene Fahrstrecke	Wechselnde Stellplätze/Haltestellen	Wechselnde Bedingungen (Indoor/Outdoor)	Keine standardisierten Abläufe	Monotone Tätigkeiten	Gefahrentransport	Mehrere Akteure	Treffen mehrerer Entscheidungen notwendig	Mehrere Kommunikationsschnittstellen	Unklare Aufgabenverteilung	Feste Zeitfenster	Mischladung	Wechselnde Aufliegerarten	Spezielle Waggons notwendig	Mehrfache Zwischenlagerung	Verschiedene Entladestrategien
Outdoor-Transportprozesse	a) Direktanlieferung Presswerk	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>
	b) Entsorgung Presswerk – Stahl	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	c) Entsorgung Presswerk – Aluminium	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	d) Direktanlieferung Karosseriebau	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	e) Versorgung Karosseriebau	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	f) Direktanlieferung Lackiererei	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>
	g) Direktanlieferung Sitzfertigung	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	h) Direktanlieferung Montage	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	i) Entsorgungsprozess Montage, Motorenbau und Sitzfertigung	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
	j) Direktanlieferung Motorenbau	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

nicht erfüllt teilweise erfüllt erfüllt

Die Eigenschaften aus den SWOT-Analysen sind der Umgebungs- und Prozesskomplexität zugeordnet worden. Die Beurteilungskriterien, die sich auf die Komplexität der Umgebung beziehen, ergeben sich aus den Chancen und Risiken, wohingegen die Kriterien der Prozesskomplexität aus den Stärken und Schwächen der Prozesse resultieren. Auf Basis dieser Matrix wurde gemeinsam mit den Prozessverantwortlichen des BMW-Werks München eine Einordnung der Prozesse vorgenommen.

Wie aus Tabelle 3-1 zu entnehmen ist, weisen die Prozesse *b)* und *c)* eine geringere Komplexität als die anderen acht Prozesse auf. Zu den Chancen der Prozesse *b)* und *c)* gehören insbesondere das niedrige Verkehrsaufkommen, die immer gleichbleibende Fahrstrecke und gleichbleibende Haltestellen sowie die standardisierten Prozessabläufe. Zu den Stärken zählen vor allem die geringe Notwendigkeit, Entscheidungen zu treffen, die eindeutige Aufgabenverteilung, flexible Zeitfenster, eine sortenreine Ladung (in Bezug auf die Ladungsträger), immer gleichbleibende Anhängerarten, fehlende Zwischenlagerungen sowie eine einheitliche Entladestrategie.

Ein entscheidender Unterschied beider Prozesse ist die Anbindung an die Gleise. Prozess *b)* wird mithilfe einer Lokomotive und Waggons durchgeführt. Die Lokomotive ist gleisgebunden und transportiert den schweren Stahlschrott direkt zum externen Entsorgungszentrum. Aus diesem Grund ist eine Automatisierung schwer umsetzbar, zumal die Stahlwürfel aus der Presse direkt in die Waggons gekippt werden. Herkömmliche Sattelaufleger könnten beim Aufprall des Stahlschrotts stark beschädigt werden. Prozess *c)* wird hingegen aktuell von einem Mitarbeiter mit einem Trailerzug durchgeführt. Aufgrund der geringeren Komplexität sowie aufgrund des Umstands, dass er das Werksgelände nicht verlässt, weist dieser Prozess ein höheres Automatisierungspotenzial als Prozess *b)* auf.

Sechs der zehn Prozesse weisen eine moderate Komplexität auf. Bei Prozess *f)* und *g)* handelt es sich um Direktanlieferungen mithilfe von Planenaufliegern und Megatraillern. Beide Prozesse bestehen aus einem Transport (LKW-Fahrer) und einem Be- und Entladevorgang (Staplerfahrer). Im Vergleich zu den weniger komplexen Prozessen sind an dieser Stelle vor allem das hohe Verkehrsaufkommen sowie die Fahrt auf der Hauptverkehrsachse als potenzielle Schwierigkeit zu nennen. Zudem müssen im Prozess *f)* Chemikalien (Gefahrgut) transportiert und gehandhabt werden. Hierdurch entstehen mehrere Zwischenlagerungen sowie die Übergabe an einen explosionsgeschützten Stapler. Prozess *g)* beinhaltet zwar kein Gefahrgut, es müssen jedoch individuelle Entscheidungen in Bezug auf die Leergutrückführung getroffen werden sowie vom Staplerfahrer Mischladung ent- und gegebenenfalls beladen werden.

Als hochkomplex sind die Prozesse e) und j) einzuordnen. Die Fahrstrecken befinden sich nicht nur auf der Hauptverkehrsachse, sondern sie beinhalten auch mehrere Entladestellen, die sich sowohl innerhalb als auch außerhalb der Hallen befinden, was zu einem Indoor-Outdoor-Wechsel führt. Des Weiteren sind mehr als zwei Akteure an den Prozessen beteiligt, dies erfordert mehrere Kommunikationsschnittstellen und Entscheidungen. Beim Prozess j) müssen außerdem feste Zeitfenster berücksichtigt werden. Zudem beinhalten beide Prozesse Mischladungen.

Es ist festzuhalten, dass auf Basis der SWOT-Analysen und der daraus resultierenden Beurteilungsmatrix die identifizierten Outdoor-Transportprozesse unterschiedlich komplex in Bezug auf die Umgebung und den Prozess für eine Automatisierung sind. Diese Erkenntnisse liefern einen wichtigen Baustein für die im nachfolgenden Abschnitt hergeleiteten Referenzprozessbausteine.

3.3 Herleitung von Referenzprozessbausteinen

Die Referenzprozessbausteine sollen die spezifischen Outdoor-Transportprozesse, die im vorherigen Abschnitt identifiziert wurden, abstrahieren und verallgemeinern. Dies dient der Adaption des Vorgehens auf weitere Anwendungsfälle. Es wird bewusst kein einzelner Referenzprozess erstellt, sondern Bausteine, die eine Flexibilität in Bezug auf unterschiedliche Prozessschritte und deren Reihenfolge zulassen. Mithilfe dieser Bausteine soll aufgezeigt werden, wie mögliche Prozesse für den Einsatz von AMRs in Outdoor-Bereichen gestaltet sein müssen, um eine bestmögliche Prozessautomatisierung zu erreichen. Hierfür werden zunächst auf Basis der Ist-Analyse Referenzprozessbausteine identifiziert und beschrieben, daraufhin Prozessziele definiert und anschließend die Soll-Prozesse mithilfe von BPMN visualisiert.

3.3.1 Identifizierung und Beschreibung der Referenzprozessbausteine

Aufbauend auf dem klassischen Materialfluss eines Automobilwerks sowie der Ist-Analyse am Beispiel des BMW-Werks München lassen sich vier Grundbausteine ableiten: die Zugmaschine, das FFZ, der Anhänger, der Ladungsträger sowie der daraus resultierende Prozess. Die nachstehende Abbildung 3-8 zeigt die einzelnen Referenzprozessbausteine mit den dazugehörigen Prozessausprägungen.

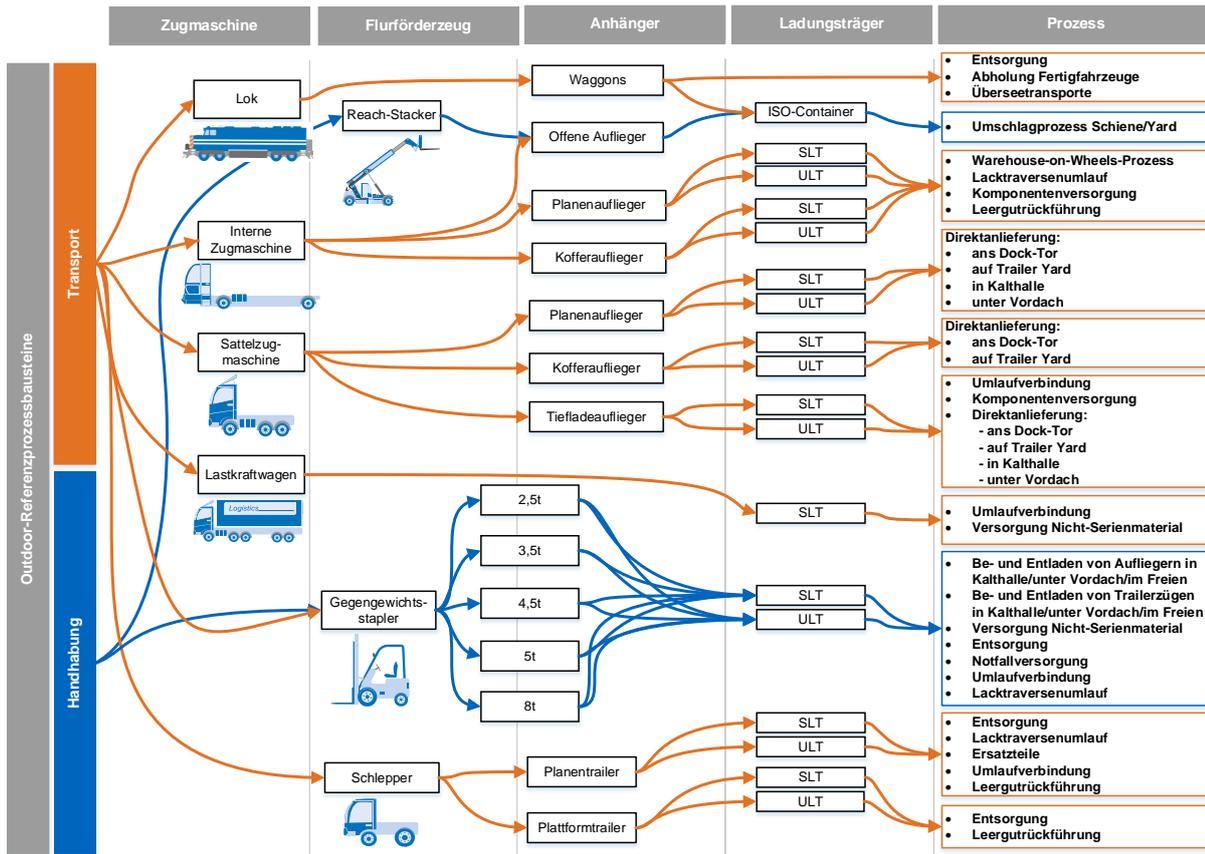


Abbildung 3-8: Referenzprozessbausteine von Outdoor-Transportprozessen auf dem Werksgelände

Als mögliche Zugmaschinen für Outdoor-Transportprozesse auf dem Werksgelände kommen Lokomotiven, werksinterne Zugmaschinen, Sattelzugmaschinen sowie mittelschwere Lastkraftwagen zum Einsatz. Lokomotiven werden mithilfe von Waggons für Entsorgungsprozesse, die Abholung der Fertigfahrzeuge oder Überseetransporte eingesetzt. Werksinterne Zugmaschinen befinden sich ausschließlich auf dem Werksgelände und werden für den Transport von offenen Aufliegern, Planenaufliegern oder Kofferaufliegern genutzt. Sattelzugmaschinen und mittelschwere Lastkraftwagen fahren sowohl auf dem Werksgelände als auch auf öffentlicher Straße. Diese Transporte werden primär von Dienstleistern übernommen. Innerhalb des Werks fahren sie Stellplätze auf dem Trailer Yard, unter dem Vordach, in Kalthallen oder an Dock-Toren an. Die unterschiedlichen Ladungsträgertypen lassen sich in ISO-Container, SLT und ULT einteilen. Tabelle 3-2 stellt die drei Ladungsträgertypen dar.

Tabelle 3-2: Darstellung der Ladungsträger: ISO-Container, SLT und ULT

ISO-Container (20- oder 40-Fuß-Container)	SLT (variiert in Länge, Breite, Höhe)	ULT (1,2 m x 0,8 m x 0,8 m)
		

Offene Auflieger, auf denen sich ISO-Container befinden, stellen in der Regel einen Umschlagprozess dar. Hierbei werden mithilfe eines Reach-Stackers¹³ Container von Waggonen auf offene Auflieger abgestellt oder umgekehrt und anschließend von werksinternen Zugmaschinen an die entsprechenden Dock-Tore transportiert. Dieser Prozess wird auch als Warehouse-on-Wheels-Prozess bezeichnet. Durch die Lagerung der Materialien und Bauteile direkt auf den Anhängern wird zusätzliche Lagerfläche auf dem Werksgelände vermieden sowie eine Just-in-Time (JIT)-Materialversorgung gewährleistet [Fli-2016, S. 52f.]. Neben den Warehouse-on-Wheels-Prozessen übernehmen die werksinternen Zugmaschinen auch Lacktraversenprozesse, die Versorgung von Komponenten sowie die Leergutrückführung.

Sattelzugmaschinen schleppen Planenaullieger oder Megatrailer, die SLT oder ULT beinhalten, über Direktanlieferung entweder auf den Trailer Yard, in die Kalthalle, unter ein Vordach oder ans Dock-Tor. Die Auflieger werden seitlich be- und entladen. Kofferaullieger hingegen können aufgrund ihrer äußeren Form ausschließlich über das Heck be- und entladen werden. Daher werden sie an Dock-Tore oder auf den Trailer Yard transportiert. Die drei Aufliegerarten unterscheiden sich in zwei wesentlichen Punkten. Zum einen handelt es sich bei den Planenaulliegern und dem Megatrailer um Auflieger mit Spannplanen ohne harte Bordwände. Zum anderen besitzt der Megatrailer eine Innenhöhe von 3 m, was ein dreifaches Stapeln von ULT ermöglicht. Der Megatrailer wird daher vorzugsweise in der Automobilindustrie verwendet.

Im nord- und südamerikanischen Raum dominiert der Einsatz von Kofferaulliegern und somit auch die Be- und Entladung über Dock-Tore und Trailer Yards. Im europäischen Raum hingegen kommen vermehrt Planenaullieger und Megatrailer zum Einsatz, welche vor allem in Kalthallen und unter Vordächern be- und entladen werden. Megatrailer eignen sich sowohl für die Direkteinlieferung als auch für Umlaufverbindungen oder die Komponentenversorgung. Mittelschwere LKW, die kein Sattelzug sind, kommen in

¹³ „Reach-Stacker“ sind Greifstapler und gehören zur Gruppe der FFZ [Weh-2020, S. 861ff.].

der Automobilindustrie nur selten zum Einsatz. Sie machen einen sehr geringen Anteil der Transporte aus und werden primär für SLT, welche Umlaufteile oder Nicht-Serienmaterial beinhalten, verwendet.

Der zuvor erwähnte Reach-Stacker, Gegengewichtsstapler und Schlepper gehören zur Gruppe der FFZ (vgl. Abbildung 3-8). Der Gegengewichtsstapler besitzt fünf Gewichtsklassen, die primär in der Automobilindustrie eingesetzt werden. Hierzu zählen 2,5 t-, 3,5 t-, 4,5 t-, 5 t- und 8 t-Stapler. Die Stapler handhaben und transportieren maximal drei übereinander gestapelte ULT oder einzelne bzw. teilweise zwei- oder dreifach gestapelte SLT. Der Großteil der Stapler wird für das Be- und Entladen von Aufliegern und Trailerzügen genutzt. Das Be- und Entladen findet entweder in der Kalthalle, unter dem Vordach oder im Freien statt. Weiterhin werden Stapler für die Versorgung des Nicht-Serienmaterials, der Entsorgung, der Notfallversorgung, für den Transport von Umlaufteilen sowie Lacktraversen eingesetzt. Schlepper, welche entweder Planen- oder Plattformtrailer schleppen (Trailerzüge) transportieren SLT oder ULT für die Entsorgung und Leergutrückführung. Handelt es sich um Behälter, deren Inhalt vor der Witterung geschützt werden muss, so besteht der Trailerzug aus einem Schlepper und einem Planentrailer. Dies betrifft Transportprozesse der Lacktraversen sowie Ersatz- und Umlaufteile.

3.3.2 Definition der Prozessziele

Erfüllung des logistischen Grundauftrags

Bevor ein Prozess automatisiert oder „*autonomisiert*“ werden kann, muss er zunächst Grundanforderungen erfüllen. Diese allgemeinen Anforderungen können mithilfe der „*Sieben-R-Regeln*“ von *Jünemann* beschrieben werden. Transportprozesse im Outdoor-Bereich müssen den gesamtheitlichen Logistikauftrag sicherstellen, indem sie das richtige Material, zur richtigen Zeit, am richtigen Ort, in der richtigen Menge, in der richtigen Qualität, zu den richtigen Kosten und zum richtigen Kunden transportieren [Jün-1989, S. 18]. Ob ein Transportprozess manuell durch einen Menschen oder automatisiert durch eine Maschine oder ein System durchgeführt wird, spielt demnach für die Erfüllung des logistischen Grundauftrags keine Rolle. Sowohl ein Mitarbeiter in beispielsweise einer Sattelzugmaschine als auch ein AMR müssen dieselben Grundanforderungen an den Prozess erfüllen. Dies kann für beide nur dann funktionieren, wenn sowohl der Mensch als auch der AMR einem Regelwerk unterliegen. Dieses Regelwerk beinhaltet Gesetze, Regeln und Vorschriften, die es bei der Ausführung der Prozesse zu beachten gilt, vom Menschen und gleichermaßen vom Roboter.

Einhaltung des vorgegebenen Regelwerks

Eine zusätzliche Herausforderung für AMRs besteht im Verstehen und Umsetzen eines Regelwerks, welches nicht nur aus Vorschriften, sondern auch aus Vernunft besteht. Das Prozessziel, Materialien an den richtigen Ort zu transportieren, beinhaltet nicht nur die bereits im Vorhinein bekannten Informationen, wie Start- und Zielpunkt oder Fahrroute, sondern auch die Fähigkeit, in bestimmten Situationen unaufgefordert handeln zu können. Ein Beispiel hierfür sind unvorhersehbare Ereignisse, wie das Blockieren der Fahrroute durch einen Gegenstand oder einen anderen Verkehrsteilnehmer. An dieser Stelle müssen sowohl Mensch als auch AMR schnell reagieren können und gegebenenfalls eine Alternativroute wählen oder aber – je nachdem wie lang das Hindernis den Weg blockiert – warten und auf der geplanten Route weiterfahren.

Wie aus den Grundlagen und dem Stand der Wissenschaft (vgl. Abschnitt 2.1) ersichtlich wurde, sind AMRs hierzu technisch in der Lage. Sie können demnach Entscheidungen auf rationaler Basis anhand vorprogrammierter Abläufe treffen. Der Mensch entscheidet ebenfalls rational, allerdings nicht in allen Fällen. Werden die Entscheidungen komplexer, unübersichtlicher oder schwieriger, so neigt der Mensch zu einer intuitiven Entscheidung. Diese beruht häufig auf Erfahrungen und Vernunft [Wil-2020]. Ob diese Entscheidungen rational gesehen dann tatsächlich auch immer die richtigen sind, bleibt offen.

Zwar zählt das Erkennen von Hindernissen und das anschließende Reagieren und Handeln sowie die Navigation im Indoor-Bereich bereits zum Stand der Technik, im Bereich des maschinellen Lernens und der Outdoor-Navigation sind hingegen noch einige Entwicklungen notwendig.

Bewältigung standardisierter und komplexer Prozesse

Wie der Ist-Analyse (vgl. Abschnitt 3.2) zu entnehmen ist, unterscheiden sich Transportprozesse erheblich in ihrer Komplexität. Einige der identifizierten Outdoor-Transportprozesse weisen eine geringere Komplexität in Bezug auf eine Automatisierung auf als andere. Dies wird vor allem anhand der Beurteilungsmatrix ersichtlich. Die aus den SWOT-Analysen resultierenden Beurteilungskriterien im Bereich der Umgebungs- und Prozesskomplexität ermöglichen eine erste Einordnung und Klassifizierung der Outdoor-Transportprozesse. Sie bedeuten aber nicht zwangsläufig, dass sich ausschließlich weniger komplexe Prozesse für den Einsatz von AMRs eignen. Für die Implementierung eines AMR spielt nicht nur die prozessuale Perspektive eine Rolle, sondern auch die technische und organisatorische. So sind aus technischer Perspektive Maschinen bzw. Roboter im Bereich der Berechnungen und Kalkulationen dem Menschen überlegen. Eine wesentliche und nicht zu unterschätzende Eigenschaft des Menschen hingegen ist das Handeln nach Vernunft sowie die Kreativität [Kas-2015].

Die Frage der Entscheidungsfindung eines autonomen Roboters gegenüber einem Menschen ist also nur unter gewissen Gegebenheiten möglich. Im Rahmen der Durchführung eines Transportprozesses beispielsweise, kann der Roboter selbständig entscheiden, ob und wenn ja, welche Alternativroute er wählt. Er wird jedoch nicht in der Lage sein, seine Handlungen im Sinne des moralischen Sitten-Gesetzes (des kategorischen Imperatives) nach *Kant* umzusetzen so wie es der Mensch kann [Chr-2001, S. 126] [Kan-2014, S. 436].

Grundsätzlich ist die Automatisierung von standardisierten Prozessen jedoch den nicht-standardisierten Prozessen vorzuziehen. Wiederkehrende, monotone Abläufe sowie Ausdauer, Geschwindigkeit und Kraft gehören zu den Stärken mobiler Roboter [Bän-2019, S. 19]. Allerdings verfügen AMRs zusätzlich zu den bereits genannten Vorteilen automatisierter mobiler Roboter über Lernfähigkeit und Anpassungsfähigkeit. Diese Fähigkeiten ermöglichen es, ihnen neben standardisierten Prozessen auch komplexere Prozesse durchzuführen. Beinhaltet ein Prozess demnach wiederkehrende monotone Abläufe, die über eine längere Zeit hinweg andauern, so ist ein automatisierter mobiler Roboter ausreichend. Allerdings können auch innerhalb standardisierter Prozesse unerwartete Ereignisse auftreten. Um den Prozess möglichst flexibel zu gestalten, ist die Reaktion auf solche Ereignisse von Vorteil. Ist diese Fähigkeit nicht vorhanden, so kann beispielsweise durch den Eingriff des Menschen oder durch eine im Vorhinein festgelegte Notstrategie auf unerwartete Ereignisse angemessen reagiert werden.

Gewährleistung der Sicherheit für Mensch und Maschine

Das Befolgen der gesetzlichen und unternehmensinternen Sicherheitsvorschriften in Bezug auf Personen hat höchste Priorität. Der Personenschutz und die Kollisionsvermeidung müssen vom AMR sichergestellt werden [Kor-2020]. Sowohl für den Menschen als auch für AMRs und FTS gelten Sicherheitsvorschriften, die bei der Durchführung von Transportprozessen berücksichtigt werden müssen.

Grundsätzlich darf von den Robotern keine Gefahr ausgehen, daher ist eine Sicherheitsdokumentation in Form einer Risikoanalyse und -beurteilung unabdingbar und gesetzlich gefordert [ISO-12100]. Die Risikobeurteilung muss jegliche Gefahren auflisten und bewerten sowie entsprechende Gegenmaßnahmen ableiten. Da der technische Aufbau und vor allem das Entscheidungsgeflecht eines AMR sehr komplex sein kann, stellt die Beurteilung möglicher Risiken eine Herausforderung dar. Wenn der Roboter autonom handeln soll, ist es nahezu unmöglich, alle Entscheidungsalternative aufzulisten und zu bewerten, sie sind schlichtweg nicht absehbar.

Eindeutige Definition des Handlungsspielraums

Um das Risiko, welches vom AMR ausgehen kann, trotzdem bewerten zu können, muss der Handlungsspielraum des Roboters eindeutig definiert und eingegrenzt werden. An dieser Stelle ist je nach Anwendung abzuwägen, wie autonom und somit auch weniger kalkulierbar oder weniger autonom und somit weniger flexibel ein mobiler Roboter sein soll bzw. sein darf. Beide, Mensch und AMR, müssen demnach über einen definierten Handlungsspielraum, welcher bestimmten Regeln und Vorschriften unterliegt, verfügen. Ein „*willkürliches*“ Verhalten ist weder vom Menschen noch vom AMR gewünscht, denn dieses kann zu Chaos und Unordnung führen.

Zusammenfassend lassen sich die folgenden fünf Prozessziele für die Referenzprozesse des Einsatzes von AMR festhalten:

- Erfüllung des logistischen Grundauftrags (7-R-Regel)
- Einhaltung des vorgegebenen Regelwerks
- Bewältigung standardisierter und komplexer Prozesse
- Gewährleistung der Sicherheit für Mensch und Maschine
- Eindeutige Definition des Handlungsspielraums

3.3.3 Visualisierung der Referenzprozessbausteine

Die definierten Prozessziele zeigen, dass ein AMR mehr Verantwortung übernehmen sollte als klassische FTS. FTS müssen – gleichermaßen wie der Mensch und der AMR – den logistischen Grundauftrag, wie z. B. das Transportieren von Materialien ohne dabei Personen zu gefährden, erfüllen. Sie können jedoch nicht entscheiden, sondern nur ausführen. Die Ausführungsabfolge muss den FTS einprogrammiert werden, wobei auch hier Alternativen mit angegeben werden können, z. B. vorprogrammierte Alternativrouten und Entscheidungsabläufe [Kau-2021].

Für den Einsatz von AMRs hingegen ist es weniger relevant, wie standardisiert und vorhersehbar ein Prozess ist, sondern vielmehr was der Handlungsspielraum ist und innerhalb welchen Regelwerks der AMR agieren darf. Auf Basis dieser Annahme und der Ist-Prozesse lassen sich die Referenzprozessbausteine für den Einsatz autonomer mobiler Roboter wie folgt grafisch darstellen (Abbildung 3-9).

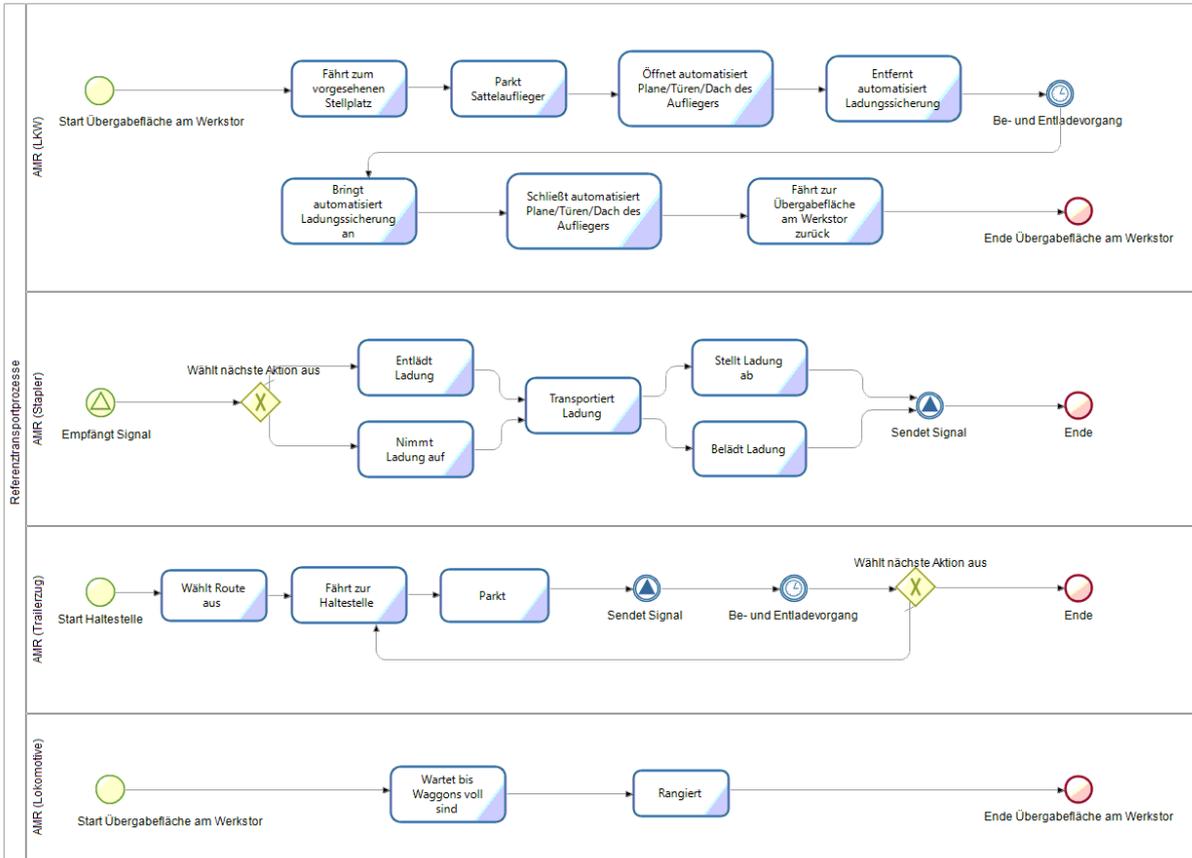


Abbildung 3-9: Referenzprozessbausteine für den Einsatz von AMR aufgeteilt nach den Verantwortlichkeiten

Die Aufteilung nach den Verantwortlichkeiten orientiert sich an den Ist-Prozessen aus Abschnitt 3.2.3. Dabei ist zunächst der LKW-Transport, welcher werksinterne Zugmaschinen, Sattelzugmaschinen oder mittelschwere Lastkraftwagen beinhaltet, zu nennen. Übernimmt ein AMR diesen Prozess, so muss zunächst eine Übergabestelle zwischen LKW-Fahrer und AMR auf dem Werksgelände eingerichtet werden. Es bietet sich an, diese gleich am Werkstor zu platzieren, um möglichst den gesamten Prozess auf dem Werksgelände mit dem AMR durchführen zu können. Dabei unterscheiden sich die Hauptaktivitäten nicht von denen des LKW-Fahrers. Das Öffnen und Schließen der Plane, der Hecktüren oder des Aufliegerdachs muss allerdings automatisiert stattfinden. Zudem müssen Kommunikationsschnittstellen zum vor- und nachgelagerten Prozess vom AMR sichergestellt werden.

Für den Stapler-Referenzprozessbaustein ist im ersten Schritt ein eingehendes Signal des vorgelagerten Prozesses, z. B. vom „AMR (LKW)“, notwendig. Anschließend folgt eine Entscheidung in Bezug auf die nächste Aktion. Soll die Ladung von einem Anhänger entladen, zur Pufferfläche transportiert und dort abgestellt werden oder handelt

es sich um das Aufnehmen von Ladung, das Transportieren und anschließende Beladen eines Anhängers? Daraufhin ist ein ausgehendes Signal an den nachgelagerten Prozess zu senden.

Der Referenzprozessbaustein „*AMR (Trailerzug)*“ wählt zunächst eine Route aus und muss somit eine erste Entscheidung treffen. Anschließend fährt er zur ersten Haltestelle, parkt dort und sendet ein Signal an den nachgelagerten Prozess. Es folgt der Be- oder Entladevorgang. Danach entscheidet der AMR die nächste Aktivität. Müssen weitere Haltestellen angefahren werden oder ist der Prozess beendet?

Der letzte Referenzprozessbaustein „*AMR (Lokomotive)*“ muss analog wie der LKW-Transport mit einer Übergabestelle auf dem Werksgelände beginnen. Übernimmt der AMR, so muss dieser warten, bis seine Waggons mit Schrott befüllt sind und anschließend zum vereinbarten Übergabeplatz rangieren, damit dort wieder eine herkömmliche Lokomotive die Waggons übernehmen und zu einem externen Entsorgungszentrum bringen kann.

Zusammenfassend zeigen die hergeleiteten Referenzprozessbausteine den Soll-Zustand der Outdoor-Transportprozesse auf einer hohen Abstraktionsebene. Dabei liegt der Fokus darauf, die Hauptaktivitäten der einzelnen Prozesse aufzuzeigen. Es fällt zudem auf, dass sich die Referenzprozessbausteine kaum von den manuellen Ist-Prozessen unterscheiden. Dies hängt vor allem damit zusammen, dass ein AMR nicht nur in der Lage sein sollte, Prozesse automatisiert auszuführen, sondern diese auch zu planen und zu steuern. Um diese übergeordnete Planungs- und Steuerungstätigkeit ausüben zu können, sind die im vorherigen Abschnitt definierten Prozessziele ausschlaggebend. Gemeinsam fließen sie in die Konzeption des Vorgehensmodells und somit in die Gestaltungsrichtlinien für die Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände ein.

4 Konzeption des Vorgehensmodells unter Verwendung von Axiomatic Design

4.1 Strukturierung und Bestandteile des Modells

Auf Basis der in Abschnitt 2.2.3 vorgestellten Axiomatic Design Methode wird nun die Konzeption des Vorgehensmodells beschrieben. Diese orientiert sich an der Axiomatic Design Vorgehensweise nach *Suh*, der Berücksichtigung von Restriktionen sowie der Anwendung funktionaler Metriken. Die einzelnen Schritte wurden gemeinsam mit einem Expertenteam – bestehend aus Wissenschaftlern, Studierenden und Anwendern – durchgeführt und werden im Nachfolgenden unterteilt [Suh-2001] [Tho-2013, S. 2f.] [Bro-2016, S. 114]:

1. Ermittlung der Kundenwünsche (CNs) und Festlegen der Restriktionen
2. Überführung der Kundenwünsche in funktionale Anforderungen (FRs) auf oberster Ebene (Schlüsselanforderung)
3. Anwendung funktionaler Metriken (FMs) auf oberster Ebene
4. Zuordnung (Mapping) der Gestaltungsparameter (DPs) zu den funktionalen Anforderungen auf oberster Ebene
5. Dekomposition (Zig-Zagging) und Mapping der einzelnen Gestaltungsfelder unter Anwendung funktionaler Metriken (FMs) nach dem Top-Down-Prinzip
6. Erstellung der Gesamt-Design Matrix

Für die Ermittlung der CNs werden die Erkenntnisse aus den Grundlagen und dem Stand der Wissenschaft, die Ergebnisse der Prozessanalyse und qualitative Interviews, die in Form einer Studie im Rahmen dieser Forschungsarbeit entstanden sind, verwendet. Im Zuge der Überführung der CNs in FRs auf oberster Ebene folgt die Festlegung von Restriktionen. Einige CNs können nicht in FRs überführt werden, da sie Restriktionen und keine Kundenwünsche darstellen [Tho-2013]. Nach dem Extrahieren der CNs und dem Festlegen der Restriktionen werden die FRs gebildet.

Um Subjektivität bei der Ermittlung der CNs zu vermeiden, schlägt *Suh* vor, die FRs auf oberster Ebene durch Priorisierung der ermittelten CNs zu definieren und diese

dann systematisch in weitere Ebenen zu zerlegen [Suh-2001]. Demzufolge wird jedes einzelne CN in eine funktionale Schlüsselanforderung überführt. Anschließend folgt die Anwendung von FMs. Sie geben an, was gemessen werden soll und überprüfen, ob ein bestimmtes FR seine beabsichtigte Funktion erfüllt. Das FM sollte ein Maß für die Erfüllung der Funktion darstellen, die das DP letztendlich liefern wird [Bro-2016, S. 116].

Im vierten Schritt werden den ermittelten FRs DPs zugeordnet, wie Abbildung 4-1 verdeutlicht. Dieser Prozess wird als Mapping (4.) bezeichnet und findet zunächst auf der obersten Ebene statt. Das Mapping erfolgt unter Berücksichtigung der beiden Axiome, dem Unabhängigkeitsaxiom und dem Informationsaxiom.

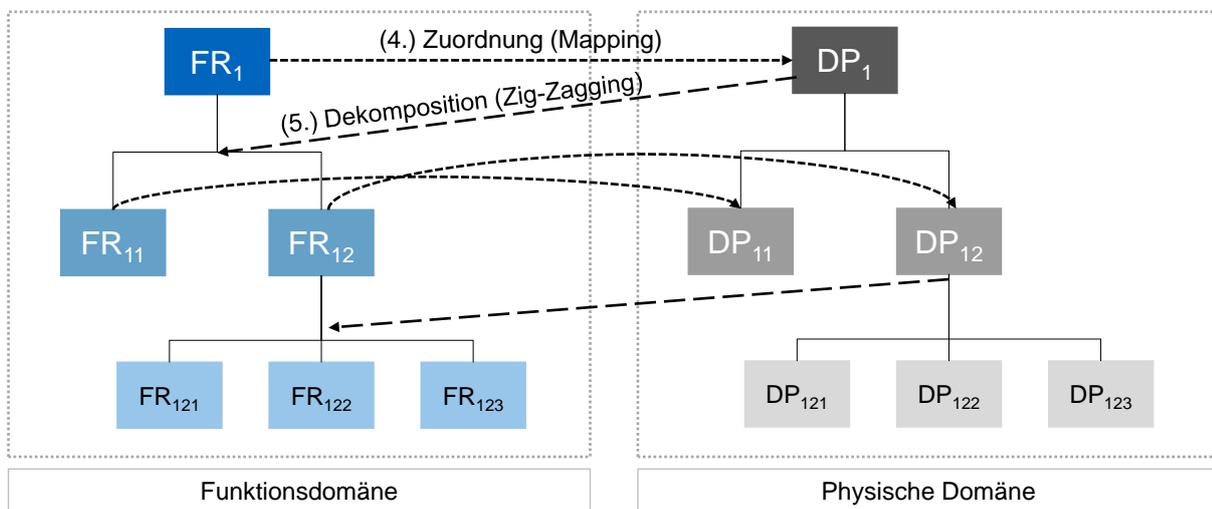


Abbildung 4-1: Mapping- und Zig-Zagging-Prozess [Suh-2001]

Da die DPs auf oberster Ebene sehr abstrakt und allgemein formuliert sind, wird im fünften Schritt der Zig-Zagging-Prozess (5.) durchgeführt. Hierbei werden die DPs auf oberster Ebene in weitere FRs zerlegt. Dieser „*Top-Down-Zig-Zagging-Prozess*“ verfeinert und detailliert das Systemdesign. Durch das Hin- und Herspringen von einem Hierarchielevel in das nächste werden die FRs auf oberster Ebene (z. B. FR₁) in Teilanforderungen (z. B. FR₁₁ und FR₁₂) zerlegt. In der physischen Domäne werden durch das Mapping dann wiederum Lösungsvorschläge in Form von DPs abgeleitet. Der Vorgang des Zig-Zagging und Mappings wird so lange durchgeführt bis ausreichend konkrete und implementierbare DPs ermittelt wurden. Bei jedem Sprung in die nächste Hierarchieebene müssen die beiden Axiome überprüft werden. Das Ergebnis des Zig-Zagging-Prozesses ist ein FR-DP-Baum, welcher die Dekomposition der verschiedenen Hierarchiestufen grafisch veranschaulicht [Suh-2001] [Bro-2005, S. 186ff.]. Zur Überprüfung des Unabhängigkeitsaxioms wird auf jeder einzelnen Hierarchiestufe

eine Design Matrix aufgestellt. Sie überprüft, ob Abhängigkeiten in Form von Kopplungen zwischen mehreren FRs und DPs bestehen. Ist dies der Fall, so müssen diese entkoppelt und gegebenenfalls neu definiert werden [Lee-2006, S. 480].

4.2 Ermittlung der Kundenwünsche und Festlegung der Restriktionen

Die Anwendung von Axiomatic Design beginnt in der ersten Domäne, der Kundendomäne sowie dem Festlegen der Restriktionen, welche sich über den gesamten Designprozess erstrecken. Die Kernaufgabe in der Kundendomäne ist die Identifizierung der CNs. Die Wünsche unterschiedlicher Stakeholder beschreiben grob, welche Eigenschaften das zu entwickelnde Vorgehen beinhalten soll. Um repräsentative CNs mit theoretischen und praktischen Grundlagen zu definieren, wird am Ende dieses Abschnitts ein Matching-Verfahren zur Vereinheitlichung durchgeführt. Der Mix aus theoretischen (Literaturübersicht) sowie anwenderbezogenen bzw. herstellerbezogenen (Prozessanalyse und qualitative Interviews) CNs stellt eine fundierte Ausgangsbasis für die Ableitung der FRs dar.

4.2.1 Literaturübersicht

Die Literaturübersicht (L), die sich aus den erarbeiteten Grundlagen und dem Stand der Wissenschaft (vgl. Kapitel 2) ergibt, liefert eine Liste bestehender theoretischer Attribute. Tabelle 4-1 fasst die CN-L zusammen.

Tabelle 4-1: Kern-CNs auf Basis der Literaturübersicht

CN-L	Bedeutung
CN-L ₁	Vorschriften und Regeln auf dem Werksgelände befolgen
CN-L ₂	Keine Menschen gefährden oder verletzen
CN-L ₃	Im Outdoor-Bereich unterschiedliche Wetter- und Straßenbedingungen meistern
CN-L ₄	Unter Outdoor-Bedingungen auf dem Werksgelände robust fahren
CN-L ₅	Transparenz und Echtzeitfähigkeit von Daten sicherstellen
CN-L ₆	Komplexität des Verkehrs im Outdoor-Bereich bewältigen
CN-L ₇	Frühzeitig auf dynamische und statische Hindernisse in der Umgebung reagieren
CN-L ₈	Umfangreiche Erfahrungen mit Outdoor-Anwendungen sammeln
CN-L ₉	Aufgaben selbständig durchführen
CN-L ₁₀	Komplexe Aufgabenstellungen meistern
CN-L ₁₁	Sofortige oder proaktive Reaktion auf Änderungen durchführen
CN-L ₁₂	Auf begrenzten Flächen rangieren und fahren

4.2.2 Prozessanalyse

Die Ergebnisse der Prozessanalyse (P) am Beispiel der BMW-Werks München liefern praktisch fundierte CNs. Die identifizierten CN-P sind der Tabelle 4-2 zu entnehmen.

Tabelle 4-2: Kern-CNs auf Basis der Prozessanalyse

CN-P	Bedeutung
<i>CN-P₁</i>	Den logistischen Grundauftrag ohne menschliches Eingreifen bewältigen
<i>CN-P₂</i>	Handlungen des Roboters verstehen
<i>CN-P₃</i>	Standardisierte und komplexe Prozesse meistern
<i>CN-P₄</i>	Sicherheit von Mitarbeitern gewährleisten
<i>CN-P₅</i>	Kollisionen vermeiden
<i>CN-P₆</i>	Kontrollierbar agieren

4.2.3 Qualitative Interviews

Weitere praktisch fundierte CNs liefert die im Rahmen dieser Forschungsarbeit erstellte Studie in Form einer Expertenbefragung zum Thema „*Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände – Aktueller Umsetzungsstand und Handlungsbedarf*“ [Cla-2019]. Ziel dieser Studie ist es, den aktuellen Stand der Technik aus Herstellersicht aufzuzeigen sowie Potenziale, Herausforderungen und Anforderungen beim Einsatz autonomer Transportsysteme auf dem Werksgelände aus Anwendersicht herauszustellen. Im Fokus stehen Transporte außerhalb der Hallen auf dem Werksgelände. Die Datenerhebung fand im Zeitraum von November 2018 bis Januar 2019 in Form von qualitativen Interviews mit 24 Experten aus den Bereichen Flurförderzeugtechnik, Automatisierungstechnik, Zulieferer und Logistikdienstleister, Unternehmensberater, E-Commerce sowie Fahrzeugbau und Automotive statt. Für die Generierung der CNs spielen insbesondere die Anforderungen für den Einsatz autonomer Transportsysteme eine wichtige Rolle. Diese lassen sich in fünf Gruppen unterteilen: Lokalisierung und Navigation, Wahrnehmung, Sicherheit, Effizienz und Prozesskontrolle [Cla-2021b, S. 243].

In Bezug auf die Lokalisierung und Navigation ist es erforderlich, dass sich der mobile Roboter ohne physikalische Vorgaben bewegt. Darüber hinaus sollte er in der Lage sein, sich sowohl in einer komplexen Umgebung innerhalb als auch außerhalb sowie in Transitbereichen von Gebäuden zu lokalisieren und zu navigieren. Die größte Herausforderung in Bezug auf die Lokalisierung und Navigation ist der Outdoor- und Transitbereich. Technische und mechanische Komponenten, z. B. Aktoren oder Sensoren eines AMR, müssen witterungsbeständig und robust sein, ebenso wie die leitlinienfreie

Navigation, die beispielsweise mit LiDAR, Radar, Ultraschall, Kamera oder GPS umgesetzt werden kann. Es ist wichtig, dass der AMR in der Lage ist, mit anderen Verkehrsteilnehmern zu interagieren, z. B. mit Fahrern von Sattelzügen, Trailerzügen, Gabelstaplern oder mit Fußgängern.

Innerhalb der zweiten relevanten Gruppe, der Wahrnehmung, nannten die Experten drei Anforderungen. Erstens muss der AMR seine komplexe Umgebung verstehen können. Auf dieser Grundlage trifft er Entscheidungen und leitet daraus Handlungen ab. Daraus lässt sich schließen, dass der AMR über kognitive Fähigkeiten verfügen muss.

Zweitens ist aus Sicht der Experten die Sicherheit von höchster Bedeutung. Sensoren, die zur Erkennung von Menschen und Hindernissen eingesetzt werden, müssen robust genug für Indoor- und Outdoor-Anwendungen sein. In verschiedenen industriellen Anwendungsfällen müssen Sensoren für die Sicherheit von Menschen zertifiziert werden. Darüber hinaus sollten diese Sensoren so ausgelegt sein, dass sie Boden- und Witterungszustände erkennen und die erforderliche Bremsleistung ableiten können. Sensoren für den Outdoor-Bereich erreichen derzeit keine Verfügbarkeit von 98 % bis 100 %, dies wird von den Experten jedoch gefordert. Mehrdimensionale Sicherheitsscanner mit mehr als einer Lage und einer besseren Winkelauflösung stellen eine Möglichkeit dar, die Verfügbarkeit zu erhöhen. Um dies zu ermöglichen ist es wichtig, Informationen in Echtzeit zu verarbeiten. Hindernisvermeidung und Positioniergenauigkeit sind noch nicht ausgereift. Die Entwicklung neuer Sensoren und besserer Algorithmen, insbesondere für den Outdoor-Bereich, ist notwendig.

Drittens müssen AMRs kosteneffizient sein. Dies bezieht sich auf alle Komponenten des mobilen Roboters, unter anderem Aktoren, Sensoren, Batterien und Antriebe. Insbesondere Sensoren für den Outdoor-Bereich sind sehr kostenintensiv. Es sollte ein Wettbewerb entstehen. Die Berücksichtigung von alternativen und nachhaltigen Antrieben ist ein wesentlicher Aspekt. Zudem sollten die Betriebskosten die Kosten eines manuell betriebenen FFZ nicht übersteigen. Die Kosten für Anpassungen der Infrastruktur müssen ebenfalls niedrig sein. Im Hinblick auf die Prozesseffizienz sollten AMRs auf kurzfristige Änderungen flexibel reagieren können. Die Anpassungsfähigkeit an neue Prozesse ist aus Sicht der Experten eine wesentliche Eigenschaft von AMRs. Darüber hinaus müssen AMRs mit ihrer Umgebung kommunizieren können, einschließlich der Infrastruktur, weiteren Fahrzeugen (manuell, automatisiert oder autonom) und Menschen.

Die letzte Gruppe von Anforderungen konzentriert sich auf die Prozesskontrolle. Kontrollsysteme von AMRs müssen einheitlich und herstellerunabhängig sein. Daher sind

Standardnormen und -richtlinien erforderlich. Nach Ansicht der Experten benötigt eine ganzheitliche Automatisierung ein einheitliches Steuerungssystem. Zusammenfassend lassen sich die CN-I auf Basis der qualitativen Interviews aus der nachstehenden Tabelle 4-3 entnehmen.

Tabelle 4-3: Kern-CNs auf Basis qualitativer Interviews

CN-I	Bedeutung
CN-I ₁	Fähigkeit im Indoor-, Outdoor- und Transitbereich zu fahren
CN-I ₂	Mit Verkehrsteilnehmern kommunizieren und interagieren
CN-I ₃	Zusammenhänge verstehen und Handlungen ableiten
CN-I ₄	Das Verhalten je nach Situation selbständig anpassen
CN-I ₅	Sichere Roboter, von denen keine Gefahr ausgeht
CN-I ₆	Logistikkosten durch den Einsatz von AMRs reduzieren
CN-I ₇	Schnell auf kurzfristige Änderungen in der Umgebung reagieren
CN-I ₈	Mehrere AMRs von unterschiedlichen Herstellern in einem Steuerungskonzept betreiben

4.2.4 Repräsentative Kundenwünsche

Da sich einige der CNs aus der Literaturübersicht, der Prozessanalyse und den qualitativen Interviews inhaltlich überschneiden, wurden sie mithilfe eines Vergleichs und Abgleichs zu repräsentativen CNs zusammengefasst. Dieser Matching- und Merging-Prozess erlaubt es, die Affinität zwischen den theoretisch und praktisch fundierten CNs zu definieren und somit die Eigenschaften sich ähnelnder CNs zu einem Kundenwunsch zusammenzufassen. Tabelle 4-4 zeigt das Ergebnis des Matching- und Merging-Prozesses.

Tabelle 4-4: Matching- und Merging-Prozess der theoretisch und praktisch fundierten CNs

CN-L, CN-P, CN-I	Repräsentative CNs
CN-L ₃ Im Outdoor-Bereich unterschiedliche Wetter- und Straßenbedingungen meistern	CN ₁ Auf dem Werksgelände fahren und unterschiedliche Wetter- und Straßenbedingungen meistern
CN-L ₄ Unter Outdoor-Bedingungen auf dem Werksgelände robust fahren	
CN-I ₁ Fähigkeit im Indoor-, Outdoor- und Transitbereich zu fahren	
CN-L ₂ Keine Menschen gefährden oder verletzen	CN ₂ Die Sicherheit von Menschen garantieren
CN-P ₄ Sicherheit von Mitarbeitern gewährleisten	
CN-P ₅ Kollisionen vermeiden	CN ₃ Kollisionen vermeiden
CN-I ₅ Sichere Roboter, von denen keine Gefahr ausgeht	

<i>CN-L₁</i>	Vorschriften und Regeln auf dem Werksgelände befolgen	<i>CN₄</i>	Vorschriften und Regeln auf dem Werksgelände befolgen
<i>CN-L₈</i>	Umfangreiche Erfahrungen mit Outdoor-Anwendungen sammeln	<i>CN₅</i>	Umfangreichere Erfahrungen mit Outdoor-Anwendungen sammeln
<i>CN-P₁</i>	Den logistischen Grundauftrag ohne menschliches Eingreifen bewältigen	<i>CN₆</i>	Den logistischen Grundauftrag ohne menschliches Eingreifen bewältigen
<i>CN-L₁₂</i>	Auf begrenzten Flächen rangieren und fahren	<i>CN₇</i>	Auf begrenzten Flächen rangieren und fahren
<i>CN-P₆</i>	Kontrollierbar agieren	<i>CN₈</i>	Kontrollierbar agieren
<i>CN-P₂</i>	Handlungen des Roboters verstehen		
<i>CN-I₂</i>	Mit Verkehrsteilnehmern kommunizieren und interagieren	<i>CN₉</i>	Mit Verkehrsteilnehmern kommunizieren und interagieren
<i>CN-L₇</i>	Frühzeitig auf dynamische und statische Hindernisse in der Umgebung reagieren		
<i>CN-L₉</i>	Aufgaben selbständig durchführen	<i>CN₁₀</i>	Die Umwelt wahrnehmen und Handlungen ableiten
<i>CN-I₃</i>	Zusammenhänge verstehen und Handlungen ableiten		
<i>CN-I₄</i>	Das Verhalten je nach Situation selbständig anpassen		
<i>CN-L₆</i>	Komplexität des Verkehrs im Outdoor-Bereich bewältigen	<i>CN₁₁</i>	Standardisierte und komplexe Situationen bewältigen
<i>CN-P₃</i>	Standardisierte und komplexe Prozesse meistern		
<i>CN-L₁₀</i>	Komplexe Aufgabenstellungen meistern		
<i>CN-L₅</i>	Transparenz und Echtzeitfähigkeit von Daten sicherstellen		
<i>CN-L₁₁</i>	Sofortige oder proaktive Reaktion auf Änderungen	<i>CN₁₂</i>	Schnelle und proaktive Reaktion auf Änderungen in der Umgebung
<i>CN-I₇</i>	Schnell auf kurzfristige Änderungen in der Umgebung reagieren		
<i>CN-I₈</i>	Mehrere AMRs von unterschiedlichen Herstellern in einem Steuerungskonzept betreiben	<i>CN₁₃</i>	Mehrere AMRs von unterschiedlichen Herstellern in einem Steuerungskonzept betreiben
<i>CN-I₆</i>	Logistikkosten durch den Einsatz von AMRs reduzieren	<i>CN₁₄</i>	Logistikkosten durch den Einsatz von AMRs reduzieren

Der Matching- und Merging-Prozess der theoretisch und praktisch fundierten CNs liefert schließlich die in Tabelle 4-5 dargestellten repräsentativen CNs.

Tabelle 4-5: Repräsentative CNs

CN	Bedeutung
CN ₁	Auf dem Werksgelände fahren und unterschiedliche Wetter- und Straßenbedingungen meistern
CN ₂	Die Sicherheit von Menschen garantieren
CN ₃	Kollisionen vermeiden
CN ₄	Vorschriften und Regeln auf dem Werksgelände befolgen
CN ₅	Umfangreiche Erfahrungen mit Outdoor-Anwendungen sammeln
CN ₆	Den logistischen Grundauftrag ohne menschliches Eingreifen bewältigen
CN ₇	Auf begrenzten Flächen rangieren und fahren
CN ₈	Kontrollierbar agieren
CN ₉	Mit Verkehrsteilnehmern kommunizieren und interagieren
CN ₁₀	Die Umwelt wahrnehmen und Handlungen ableiten
CN ₁₁	Standardisierte und komplexe Situationen bewältigen
CN ₁₂	Schnelle und proaktive Reaktion auf Änderungen in der Umgebung
CN ₁₃	Mehrere AMRs von unterschiedlichen Herstellern in einem Steuerungskonzept betreiben
CN ₁₄	Logistikkosten durch den Einsatz von AMRs reduzieren

4.2.5 Festlegung von Restriktionen

Bevor die CNs in FRs auf oberster Ebene überführt werden können, müssen zunächst die Restriktionen festgelegt werden. Restriktionen stellen die Grenzen für die akzeptablen DPs dar und unterscheiden sich von den FRs dadurch, dass sie nicht unabhängig sein müssen [Suh-1998, S. 191] [Tho-2013]. Für die Gestaltung des Vorgehens sind drei wesentliche Restriktionen zu beachten, die bereits in Abschnitt 2.3.1 Tabelle 2-5 in Form eines morphologischen Kastens vorgestellt wurden:

- Anwendungen im Outdoor-Bereich
- Anwendungen innerhalb der Intralogistik
- Anwendungen auf Werksgeländen bzw. Betriebshöfen

Die resultierenden Gestaltungsrichtlinien sind für den Einsatz von mobilen Robotern im Outdoor-Bereich innerhalb der Intralogistik auf dem Werksgelände vorgesehen.

4.3 Überführung der Kundenwünsche in funktionale Anforderungen auf oberster Ebene

Auf Basis der in Abschnitt 4.2.4 erarbeiteten repräsentativen CNs sowie der Festlegung der Restriktionen ist anschließend die Definition der FRs auf oberster Ebene möglich. Diese FRs stellen die Schlüsselanforderungen dar. Ausgehend von der Zielsetzung dieser Forschungsarbeit wird die übergeordnete Schlüsselanforderung (FR_0) für das zu entwickelnde Vorgehen wie folgt definiert:

FR_0 Autonome und robuste mobiler Roboter auf dem Werksgelände implementieren

Um diese Anforderung zu erfüllen, wird FR_0 auf der physischen Gestaltungsdomain eine Lösung (DP_0) zugeordnet:

DP_0 Gestaltungsrichtlinien für die Implementierung autonomer und robuster mobiler Roboter auf dem Werksgelände

Das vorgeschlagene DP_0 ist sehr allgemein und abstrakt formuliert. Daher muss es im nachfolgenden Schritt in weitere FRs zerlegt werden um für die Gestaltung der Richtlinien konkrete Parameter (FRs) und Lösungen (DPs) aufzuweisen. Tabelle 4-6 zeigt die Transformation der 14 CNs in FRs auf oberster Ebene.

Tabelle 4-6: Transformation der CNs in FRs auf oberster Ebene

CN	FR
CN_1 Auf dem Werksgelände fahren und unterschiedliche Wetter- und Straßenbedingungen meistern	FR_2 Unter Outdoor-Bedingungen auf dem Werksgelände robust lokalisieren und navigieren
CN_2 Die Sicherheit von Menschen garantieren	FR_3 Personenschutz gewährleisten und Kollisionen vermeiden
CN_3 Kollisionen vermeiden	FR_3 Personenschutz gewährleisten und Kollisionen vermeiden
CN_4 Vorschriften und Regeln auf dem Werksgelände befolgen	FR_3 Personenschutz gewährleisten und Kollisionen vermeiden
CN_5 Umfangreiche Erfahrungen mit Outdoor-Anwendungen sammeln	FR_2 Unter Outdoor-Bedingungen auf dem Werksgelände robust lokalisieren und navigieren
CN_6 Den logistischen Grundauftrag ohne menschliches Eingreifen bewältigen	FR_4 Roboterfunktionen selbständig planen und steuern
CN_7 Auf begrenzten Flächen rangieren und fahren	FR_2 Unter Outdoor-Bedingungen auf dem Werksgelände robust lokalisieren und navigieren

CN_8	Kontrollierbar agieren	FR_4	Roboterfunktionen selbständig planen und steuern
CN_9	Mit Verkehrsteilnehmern kommunizieren und interagieren	FR_1	Betrieblichen Materialfluss auf dem Werks-gelände verbessern
CN_{10}	Die Umwelt wahrnehmen und Handlungen ableiten	FR_2	Unter Outdoor-Bedingungen auf dem Werks-gelände robust lokalisieren und navigieren
CN_{10}	Standardisierte und komplexe Situationen bewältigen	FR_1	Betrieblichen Materialfluss auf dem Werks-gelände verbessern
CN_{12}	Schnelle und proaktive Reaktion auf Änderungen in der Umgebung	FR_1	Betrieblichen Materialfluss auf dem Werks-gelände verbessern
CN_{13}	Mehrere AMRs von unterschiedlichen Herstellern in einem Steuerungskonzept betreiben	FR_4	Roboterfunktionen selbständig planen und steuern
CN_{14}	Logistikkosten durch den Einsatz von AMRs reduzieren	FR_5	Wirtschaftlich effizient sein

Auf oberster Ebene lassen sich neben dem übergeordneten FR_0 fünf weitere Schlüsselanforderungen ableiten. Diese werden der Übersicht halber fünf Gestaltungsfeldern zugeordnet. Das erste Gestaltungsfeld beinhaltet die Prozessverbesserung und Anforderungen an den betrieblichen Materialfluss. Daraufhin folgt die technische Machbarkeit, welche alle Hardware- und Softwareanforderungen, die vom AMR erfüllt werden müssen, enthält. Den dritten Bereich bildet das Sicherheitssystem. Dieses umfasst jegliche Anforderungen auf dem Gebiet des Personen- und Kollisionsschutzes. Die Auftragssteuerung bildet das vierte Gestaltungsfeld. Hierbei handelt es sich vor allem um Anforderungen zur selbständigen Planung und zum eigenständigen Handeln des Roboters. Das letzte Gestaltungsfeld umfasst die Wirtschaftlichkeit. Hierzu zählen Anforderungen aus der Kosten- und Investitionsplanung.

4.4 Anwendung funktionaler Metriken auf oberster Ebene

Neben der klassischen Anwendung von Axiomatic Design kommen im Rahmen dieser Forschungsarbeit zusätzlich FMs zum Einsatz. *Melnyk et al.* bezeichnen Metriken als ein wichtiges Bindeglied zwischen Strategie, Ausführung und schlussendlicher Wertschöpfung [Mel-2004, S. 209]. Wie zuvor erwähnt, dienen sie zur Qualitätssicherung und Eignungsüberprüfung der einzelnen FRs und den jeweiligen DPs. Sie stellen unter anderem sicher, dass bei einer Auswahl mehrerer DPs das am besten geeignete DP für ein bestimmtes FR ausgewählt wird. Somit wird Subjektivität im Designprozess reduziert und eine Vergleichsbasis geschaffen.

Die Verwendung von FMs stärkt zusätzlich die Aussagekraft der FRs. Metriken erfüllen die grundlegenden Aktivitäten des Messens, des Aufklärens und des Steuerns [Mel-2004, S. 209f.]. Somit leisten sie einen erheblichen Mehrwert zum Entwurfskonzept. Die Ergänzung der Dekompositionen um FMs erleichtert zudem die Identifizierung und Anpassung von DPs mit unterschiedlicher Leistung. Weist das Gesamtentwurfskonzept eine unzureichende Leistung auf, kann es ohne FMs schwierig sein, die Ursachen zu ermitteln [Hen-2016, S. 206f.] [Aus-1996, S. 21ff.]. Als kritisch zu betrachten ist hingegen der teils subjektive Einfluss bei der Wahl der Dekompositionstiefe. Allerdings tritt diese Subjektivität auch ohne die Verwendung von Axiomatic Design auf. Durch die systematische Anforderungsermittlung sowie Zerlegung und Zuordnung nach dem Top-Down-Prinzip bietet Axiomatic Design vielmehr ein hilfreiches Werkzeug für die Konzeption des Vorgehensmodells.

Mit dem Einsatz von Metriken innerhalb von Axiomatic Design haben sich bereits mehrere Autoren beschäftigt. Zu diesen zählen insbesondere *Brown, Henley* und *Cochran et al.* In ihren Veröffentlichungen beschreiben sie die Vorgehensweise zum Einsatz von FMs [Hen-2015] [Hen-2016] [Bro-2016] [Coc-2016].

Die Vorgehensweise zur Ermittlung der FMs in dieser Forschungsarbeit ist an das Vorgehen von *Brown* und *Henley* angelehnt [Hen-2016]. Bevor jedoch mit dem Mapping der DPs und FRs auf oberster Ebene sowie der Dekomposition der einzelnen Gestaltungsfelder fortgefahren werden kann, wird zunächst das methodische Vorgehen zur Ableitung der Gestaltungsrichtlinien mithilfe von Axiomatic Design und FMs vorgestellt (Abbildung 4-2).

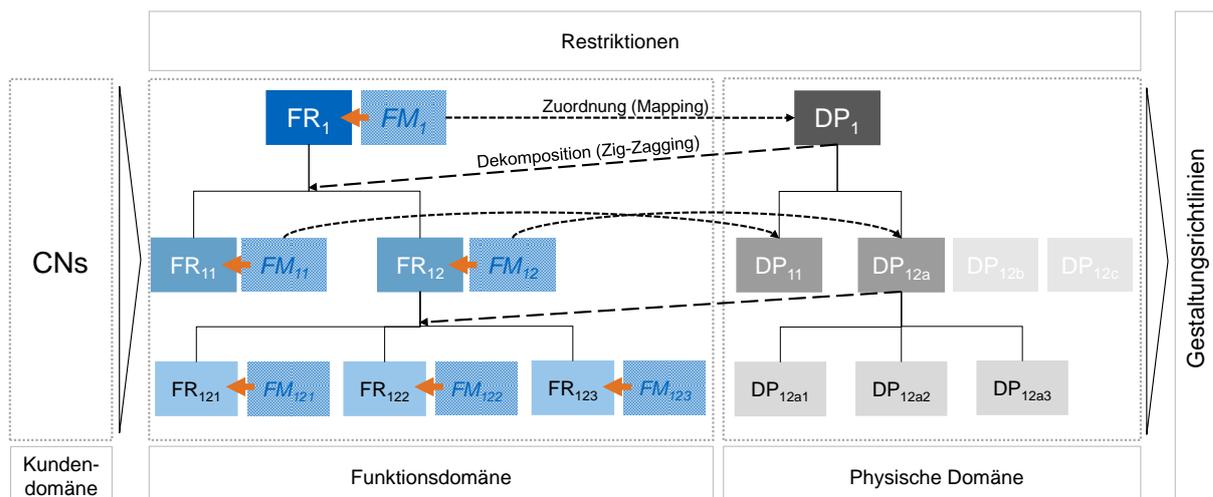


Abbildung 4-2: Methodisches Vorgehen zur Ableitung der Gestaltungsrichtlinien mithilfe von Axiomatic Design und FMs

Zunächst wird den FRs auf oberster Ebene (FR_{1-5}) ein FM zugewiesen und anschließend ein DP zugeordnet. Die zugewiesenen FMs haben ein gemeinsames Ziel, sie identifizieren das am besten geeignete DP für ein bestimmtes FR. Um dies zu erreichen, ist die höchste Priorität die Korrektheit und Aussagekraft der Metriken [Die-2007, S. 14]. Die nachfolgende Tabelle 4-7 zeigt die zugewiesenen FMs zu den FRs auf oberster Ebene.

Tabelle 4-7: Zuweisung der FMs zu den FRs auf oberster Ebene

FRs	FMs
FR_1 Betrieblichen Materialfluss auf dem Werksgelände verbessern	FM_1 Effizienz (Output-/Input-Verhältnis)
FR_2 Unter Outdoor-Bedingungen auf dem Werksgelände robust lokalisieren und navigieren	FM_2 Verfügbarkeit
FR_3 Personenschutz gewährleisten und Kollisionen vermeiden	FM_3 Häufigkeit der Unfälle/Kollisionen
FR_4 Roboterfunktionen selbständig planen und steuern	FM_4 Häufigkeit menschlicher Eingriffe
FR_5 Wirtschaftlich effizient sein	FM_5 Return on Investment (ROI)

Auf Basis der FRs und den dazugehörigen FMs werden im nachfolgenden Abschnitt die DPs zugeordnet.

4.5 Zuordnung der Gestaltungsparameter zu den funktionalen Anforderungen auf oberster Ebene

Nach *Suh* ist ein Kerngedanke von Axiomatic Design während des Zuordnungs- und Dekompositionsprozesses, eine lösungsneutrale Formulierung der FRs [Suh-2001]. Ziel ist es, kreativ und frei über mögliche Lösungen nachzudenken, ohne sich dabei von bereits existierenden oder naheliegenden Lösungen beeinflussen zu lassen. Höchste Priorität hat dabei immer die Einhaltung des Unabhängigkeitsaxioms und des Informationsaxioms. Ausgehend von FR_0 und DP_0 , sowie den zuvor abgeleiteten Schlüsselanforderungen (FR_{1-5}) und deren FMs lassen sich nun auf der ersten Hierarchieebene DPs ableiten. Abbildung 4-3 veranschaulicht den FR-DP-Baum auf oberster Ebene mit Kennzeichnung der Gestaltungsfelder.

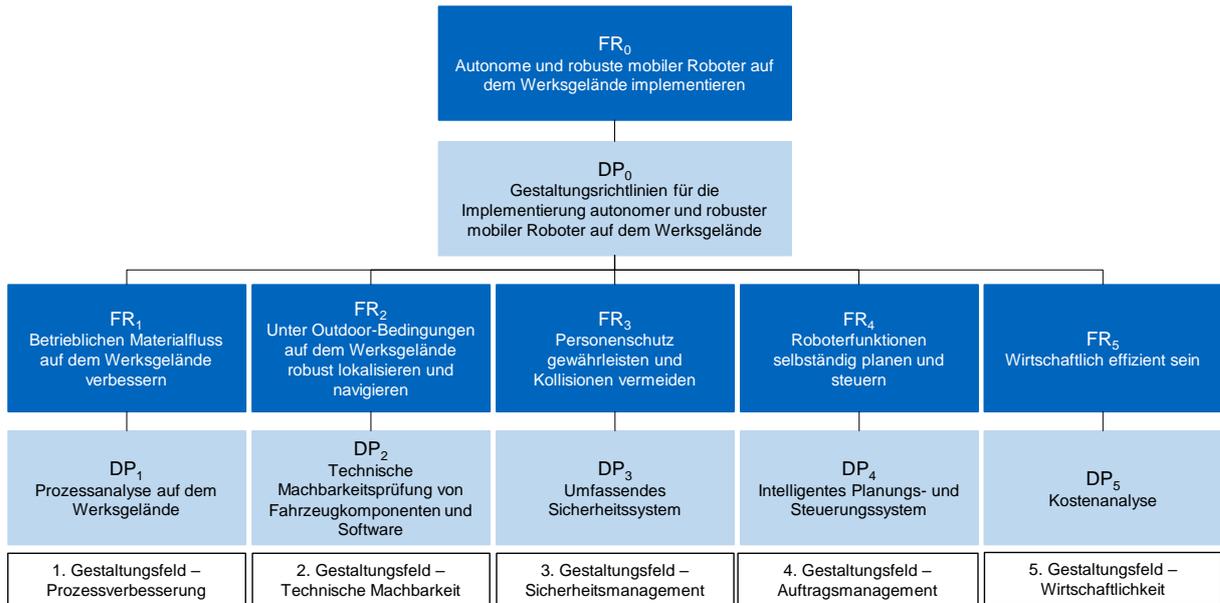


Abbildung 4-3: Grafische Darstellung des FR-DP-Baums der obersten Ebene

Um zu überprüfen, ob das erste Axiom (Unabhängigkeitsaxiom) erfüllt ist, wird eine Gleichung von FRs und DPs auf oberster Ebene aufgestellt. Gleichung 4-1 stellt einen entkoppelten Entwurf einer Triangulärmatrix auf oberster Ebene dar.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & X & 0 & 0 \\ X & X & X & X & 0 \\ X & X & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \end{pmatrix} \quad (4-1)$$

Die Prozessanalyse bildet den Ausgangspunkt. Erst nach dem Aufdecken von Schwachstellen oder möglichen Potenzialen ist eine Implementierung sinnvoll. Demnach wirkt sich DP₁ sowohl auf die technische Auslegung (FR₂) als auch auf die Roboterfunktionen (FR₄) und die Wirtschaftlichkeit (FR₅) aus. Das umfassende Sicherheitssystem (FR₃) muss hingegen unabhängig von der Prozessanalyse gegeben sein.

Neben der Kopplung zu FR₂ hat DP₂ einen Bezug zu FR₃, FR₄ und FR₅, da die Auslegung des Sicherheitssystems, die selbständige Planung und Steuerung von Roboterfunktionen sowie die Wirtschaftlichkeit in direktem Zusammenhang mit der technischen Machbarkeit der Roboterhardware und Software stehen.

Das umfassende Sicherheitssystem (DP₃) weist eine Beziehung zu FR₄ auf. DP₃ spielt eine wichtige Rolle für die intelligente Planung und Steuerung, welche die Anforderungen an die Sicherheit zu jeder Zeit erfüllen muss. Das intelligente Planungs- und Steuerungssystem (DP₄) weist keine direkte Beziehung zu einem weiteren FR auf.

Die dargestellte entkoppelte Triangularmatrix (Gleichung 4-1) widerspricht dem Unabhängigkeitsaxiom, da ein FR teilweise von mehreren DPs erfüllt wird. Bei näherer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass die zwischen den FRs und DPs bestehenden Abhängigkeiten überschaubare Rückkopplungsschleifen erzeugen, wenn die DPs in der richtigen Reihenfolge von links nach rechts implementiert werden. Daher kann die entkoppelte Matrix als „gutes“ Design eingestuft werden, sofern der Wert von DP_1 vor dem Wert von DP_2 und der Wert von DP_2 vor dem Wert von DP_3 usw. gesetzt wird (vgl. Abschnitt 2.2.3) [Suh-1998, S. 200ff.] [Bot-2008].

4.6 Dekomposition und Zuordnung der einzelnen Gestaltungsfelder unter Anwendung funktionaler Metriken

Ausgehend von der Dekomposition auf oberster Ebene sowie der Zuweisung der FMs wird nachfolgend der Dekompositionsprozess für die einzelnen Gestaltungsfelder durchgeführt. Entscheidend ist an dieser Stelle der Top-Down-Ansatz, welcher sich fortlaufend durch den Dekompositionsprozess zieht. Innerhalb der Gestaltungsfelder wird jede Hierarchieebene einzeln betrachtet. Aufgrund des Umfangs des Dekompositionsprozesses innerhalb der einzelnen Gestaltungsfelder wird in diesem Abschnitt nur kurz auf die Herleitungen eingegangen. Anhang B.1 und B.2 bietet jedoch eine detailliertere Übersicht des Dekompositionsprozesses inklusive Baumdiagrammen.

Die FMs werden auf Basis des vorgestellten Vorgehens (vgl. Abbildung 4-2) für jedes Gestaltungsfeld und entsprechendes FR auf den einzelnen Hierarchieebenen gebildet. Somit ist nicht nur die Auswahl des am besten geeigneten DPs für ein FR sichergestellt, sondern es findet zugleich eine Überprüfung der Eignung eines DPs zu einem bestimmten FR statt.

4.6.1 Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung

Die Anforderung, den betrieblichen Materialfluss auf dem Werksgelände zu verbessern (FR_1), kann mithilfe einer Prozessanalyse (DP_1) umgesetzt werden. Die Prozessanalyse gibt Aufschluss über die Struktur und Inhalte der einzelnen Prozesse. Sie zeigt Material- und Informationsströme sowie Verantwortlichkeiten auf. Dadurch werden Stärken und Schwächen der Prozesse im Hinblick auf eine mögliche Automatisierung sichtbar. Letztendlich dient die Prozessanalyse der Beurteilung einzelner Prozesse und konkret im Rahmen dieser Forschungsarbeit der Eignung der Automatisierbarkeit durch AMRs. Tabelle 4-8 zeigt die fünf Teilanforderungen von DP_1 .

Tabelle 4-8: Dekomposition FR_1 im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung

DP ₁ – Prozessanalyse auf dem Werksgelände				
FR_{11}	Grund der Prozessanalyse aufzeigen	DP_{11}	Definition des Prozessziels	FM_{11} Effizienz
FR_{12}	Struktur des Werksgeländes erfassen	DP_{12}	Layoutanalyse	FM_{12} Granularität der Prozessunterteilung
FR_{13}	Prozesse auf hoher Abstraktionsebene überblicken	DP_{13}	Prozessidentifikation	FM_{13} Anzahl der Prozesse (in einem Subsystem)
FR_{14}	Detaillierte Inhalte der Prozesse beschreiben	DP_{14}	Prozessbeschreibung	FM_{14} Prozessoutput (Prozessoutput charakterisieren und quantifizieren)
FR_{15}	Eignung der Prozesse überprüfen	DP_{15}	Prozessbeurteilung	FM_{15} Automatisierungspotenzial

Den Grund für die Durchführung einer Prozessanalyse (FR_{11}) zeigt die Definition des Prozessziels (DP_{11}) auf. Gemessen werden kann dieser Grund durch die Effizienz (FM_{11}). DP_{11} hat keine direkte Beziehung zu einem weiteren nachfolgenden FR. Um die Struktur des Werksgeländes zu erfassen (FR_{12}), bietet sich eine Layoutanalyse (DP_{12}) an. Anschließend folgt eine Prozessidentifikation (DP_{13}), die eine mögliche Lösung für FR_{13} darstellt. An dieser Stelle sind noch keine detaillierten Inhalte der Prozesse bekannt, daher sollte eine Prozessbeschreibung (DP_{14}) angefertigt werden. Im letzten Schritt sorgt eine Prozessbeurteilung (DP_{15}) für die Eignungsüberprüfung der Prozesse (FR_{15}). Die Eignung eines Prozesses kann mithilfe des Automatisierungspotenzials (FM_{15}) gemessen werden.

Zur Überprüfung des Unabhängigkeitsaxioms dient die Design Matrix. Sie stellt ein ungekoppeltes und somit „ideales“ Design dar (Gleichung 4-2).

$$\begin{Bmatrix} FR_{11} \\ FR_{12} \\ FR_{13} \\ FR_{14} \\ FR_{15} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{11} \\ DP_{12} \\ DP_{13} \\ DP_{14} \\ DP_{15} \end{Bmatrix} \quad (4-2)$$

Die Prozessidentifikation (DP_{13}) lässt sich in weitere Teilanforderungen zerlegen. Tabelle 4-9 zeigt die Dekomposition von FR_{13} auf dritter Ebene.

Tabelle 4-9: Dekomposition FR_{13} im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung

DP ₁₃ – Prozessidentifikation					
FR_{131}	Prozesse erfassen	DP_{131}	Prozessaufnahme	FM_{131}	Verständlichkeit
FR_{132}	Prozesstypen klassifizieren	DP_{132}	Referenzprozesse	FM_{132}	Vergleichbarkeit
FR_{133}	Strategische Relevanz des Prozesses bestimmen	DP_{133}	Definition von Kern- und Subprozessen	FM_{133}	Anzahl der Kern- und Subprozesse
FR_{134}	Prozesszusammenhänge erkennen	DP_{134}	Definition von vor- und nachgelagertem Prozess	FM_{134}	Anzahl der Prozesszusammenhänge
FR_{135}	Engpasssituationen erfassen	DP_{135}	Lösungskonzepte	FM_{135}	Theoretischer Output

Die Teilanforderungen an die Prozessidentifikation (DP₁₃) bestehen aus dem Erfassen der einzelnen Prozesse (FR₁₃₁), dem Klassifizieren der Prozesstypen (FR₁₃₂), dem Bestimmen der strategischen Relevanz der Prozesse (FR₁₃₃), dem Erkennen von Prozesszusammenhängen (FR₁₃₄) sowie dem Erfassen von Engpasssituationen (FR₁₃₅). Die dazugehörigen Lösungsvorschläge setzen sich aus der Prozessaufnahme (DP₁₃₁), den Referenzprozessen (DP₁₃₂), der Definition von Kern- und Subprozessen (DP₁₃₃), der Definition von vor- und nachgelagertem Prozess (DP₁₃₄) sowie dem Aufstellen von Lösungskonzepten (DP₁₃₅) zusammen.

Dabei geht es bei der Prozessidentifikation nicht direkt um eine detaillierte Beschreibung, sondern darum, sich einen groben Überblick über die vorhandenen Prozesse zu verschaffen. Dieser Grobübersicht sowie eine Klassifizierung der Prozesse auf einer hohen Abstraktionsebene lassen sich im nächsten Schritt mit Referenzprozessbausteinen abbilden, z. B. nach Art des Transportfahrzeugs (Trailerzug, Sattelzug oder Stapler). Auf Basis dessen müssen anschließend die Kern- und Subprozesse sowie die vor- und nachgelagerten Prozesse identifiziert werden. Sie beinhalten wichtige Informationen für den zu automatisierenden Prozess, beispielsweise in Bezug auf Übergabestellen oder Prozessabhängigkeiten. An dieser Stelle ist zu beachten, dass nicht nur der zu automatisierende Prozess betrachtet werden muss, sondern auch alle Prozesse und demnach auch Verantwortlichkeiten, die mit dem zu automatisierenden Prozess in Berührung kommen. Denn in der Regel müssen nicht nur Anpassungen an diesem Prozess vorgenommen werden, sondern auch an den angrenzenden Prozessen.

Die zugehörige Design Matrix stellt ebenfalls ein ungekoppeltes Design dar (Gleichung 4-3).

$$\begin{Bmatrix} FR_{131} \\ FR_{132} \\ FR_{133} \\ FR_{134} \\ FR_{135} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{131} \\ DP_{132} \\ DP_{133} \\ DP_{134} \\ DP_{135} \end{Bmatrix} \quad (4-3)$$

Neben der Prozessidentifikation (DP_{13}) lässt sich auch die Prozessbeschreibung (DP_{14}) in weitere Anforderungen unterteilen (Tabelle 4-10).

Tabelle 4-10: Dekomposition FR_{14} im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung

DP ₁₄ – Prozessbeschreibung				
FR_{141}	Detaillierte Prozessabfolgen darstellen	DP_{141}	Ablaufdiagramm	FM_{141} Verständlichkeit
FR_{142}	Zuständigkeiten erfassen	DP_{142}	Definition der Verantwortlichkeiten	FM_{142} Anzahl der Verantwortlichen
FR_{143}	Benötigte Ressourcen erfassen	DP_{143}	Materialflussanalyse	FM_{143} Menge der benötigten Ressourcen
FR_{144}	Übergaben erfassen	DP_{144}	Schnittstellendefinition	FM_{144} Anzahl der Übergaben
FR_{145}	Gemeinsamkeiten und Unterschiede der einzelnen Prozesse aufzeigen	DP_{145}	Definition von Leistungsindikatoren	FM_{145} Vergleichbarkeit

Um Prozessabfolgen detailliert und zugleich übersichtlich sowie verständlich darzustellen (FR_{141}), eignen sich vor allem Ablaufdiagramme (DP_{141}). Sie stellen die Abfolge der einzelnen Aufgaben innerhalb eines Prozesses visuell dar. DP_{141} wirkt sich zudem auf das Erfassen der Zuständigkeiten (FR_{142}), der benötigten Ressourcen (FR_{143}) sowie der Übergaben (FR_{144}) aus, denn all diese Teilanforderungen sind Inhalt eines Ablaufdiagramms.

Zuständigkeiten (FR_{142}) lassen sich durch die Definition der Verantwortlichkeiten (DP_{142}) erfassen. An dieser Stelle geht es vor allem darum, wer den Prozess durchführt. Dies können z. B. eigene Mitarbeiter oder auch Dienstleister bzw. Fremdfirmen sein. DP_{142} wirkt sich außerdem auf die benötigten Ressourcen (FR_{143}) aus. Je nachdem, ob beispielsweise ein Dienstleister oder ein eigener Mitarbeiter den Prozess bedient, muss das benötigte Equipment, wie Stapler oder Trailerzüge, vom Dienstleister oder dem eigenen Unternehmen bereitgestellt werden. Auch in Bezug auf das Erfassen der Übergaben (FR_{144}) sind die Verantwortlichkeiten (DP_{142}) von Relevanz, da sie z. B. „Handover“ zwischen unterschiedlichen Verantwortlichkeiten beinhalten.

Die Materialflussanalyse (DP₁₄₃) umfasst alle relevanten Ressourcen (FR₁₄₃), welche für einen Prozess benötigt werden, wie z. B. das Transportfahrzeug, die Lagerungen und ungewollte Aufenthalte aller Materialien im Unternehmen. Das Erfassen von Übergaben (FR₁₄₄) kann mithilfe von Schnittstellendefinitionen (DP₁₄₄) bestimmt werden. Anhand von DP₁₄₄ können diese Übergaben erfasst und dokumentiert werden. Die letzte Teilanforderung, das Aufzeigen von Gemeinsamkeiten und Unterschieden (FR₁₄₅), kann mit der Definition von Leistungsindikatoren, wie z. B. der Durchlaufzeit, den Beständen, der Kapazitätsauslastung oder der Termintreue erreicht werden (DP₁₄₅).

Die dazugehörige Design Matrix ist der Gleichung 4-4 zu entnehmen und stellt, aufgrund der Rückkopplungen einzelner DPs zu mehr als einem FR, ein entkoppeltes Design dar.

$$\begin{pmatrix} FR_{141} \\ FR_{142} \\ FR_{143} \\ FR_{144} \\ FR_{145} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 & 0 \\ X & X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{141} \\ DP_{142} \\ DP_{143} \\ DP_{144} \\ DP_{145} \end{pmatrix} \quad (4-4)$$

Ablaufdiagramme können in unterschiedlicher Form dargestellt werden, daher wird DP₁₄₁ in der nachfolgenden Tabelle 4-11 nochmals zerlegt.

Tabelle 4-11: Dekomposition FR₁₄₁ im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung

DP ₁₄₁ – Ablaufdiagramm					
FR ₁₄₁₁	Prozesse leicht verständlich darstellen (diagrammbasierte Methoden)	DP ₁₄₁₁	Grafische Modellierungssprache	FM ₁₄₁₁	Detaillierungsgrad
FR ₁₄₁₂	Prozesse leicht verständlich darstellen (computerbasierte Methoden)	DP ₁₄₁₂	Prozesssimulation	FM ₁₄₁₂	Detaillierungsgrad

Mithilfe von grafischen Modellierungssprachen (DP₁₄₁₁), wie sie bereits in Abschnitt 2.2.4 vorgestellt wurden, können Prozesse nicht nur beschrieben, sondern auch visuell veranschaulicht werden (FR₁₄₁₁). Anhand von Symbolen im Diagramm werden Zuständen, Zustandswechsel, Verantwortlichkeiten, Entscheidungen und Abfolgen, welche einem konkreten Pfad entsprechen, visuell abgebildet. Neben den grafischen Modellierungssprachen ist es auch möglich, Prozesssimulationen (DP₁₄₁₂) durchzuführen. Sie stellen eine computerbasierte Methode zur Darstellung von Prozessen (FR₁₄₁₂) dar.

Es bestehen keine weiteren Verbindungen zwischen FRs und DPs, daher weist die Design Matrix ein ungekoppeltes Design auf (Gleichung 4-5).

$$\begin{Bmatrix} FR_{1411} \\ FR_{1412} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{1411} \\ DP_{1412} \end{Bmatrix} \quad (4-5)$$

Die Prozessbeurteilung (DP₁₅) kann ebenfalls in zwei weitere Teilanforderungen zerlegt werden. Wie bereits zuvor erwähnt, ist ein Ziel der Prozessanalyse das Aufdecken von Schwachstellen und Potenzialen (FR₁₅₁). Hierfür ist ein möglicher Lösungsparameter die Schwachstellenanalyse (DP₁₅₁) z. B. in Form einer SWOT-Analyse, einem Ist/Soll-Vergleich oder einem Ishikawa-Diagramm, auch als Fischgräten-Diagramm bezeichnet. Gemessen werden kann FR₁₅₁ mithilfe der Anzahl von Prozessengpässen, sogenannten „*Bottlenecks*“ (FM₁₅₁). DP₁₅₁ hat außerdem eine Beziehung zur Eignung der Prozesse im Hinblick auf die Automatisierbarkeit (FR₁₅₂), da die Schwachstellenanalyse (DP₁₅₁) Einfluss auf die Eignung der Prozesse (FR₁₅₂) hat. Nicht jeder Prozess eignet sich gleichermaßen für eine Automatisierung mit AMRs. Die zu Beginn einer Prozessanalyse festgelegten Ziele sind die Basis für die Feststellung dieser Eignung (FR₁₅₂). Die Eignungsanalyse (DP₁₅₂) bietet hierfür einen passenden Lösungsparameter. Mithilfe des Automatisierungsgrads (FM₁₅₂) kann diese Eignung quantitativ bewertet werden. Tabelle 4-12 fasst die Dekomposition zusammen.

Tabelle 4-12: Dekomposition FR₁₅ im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung

DP ₁₅ – Prozessbeurteilung					
FR ₁₅₁	Schwachstellen und Potenziale der Prozesse erkennen	DP ₁₅₁	Schwachstellenanalyse	FM ₁₅₁	Anzahl Prozessengpässe
FR ₁₅₂	Eignung der Prozesse im Hinblick auf Automatisierung	DP ₁₅₂	Eignungsanalyse	FM ₁₅₂	Automatisierungsgrad

Aufgrund der Verbindung zwischen DP₁₅₁ und FR₁₅₂ handelt es sich um eine entkoppelte Design Matrix (Gleichung 4-6).

$$\begin{Bmatrix} FR_{151} \\ FR_{152} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{151} \\ DP_{152} \end{Bmatrix} \quad (4-6)$$

4.6.2 Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit

Nicht jeder Roboter weist die technischen Fähigkeiten auf, sich im Outdoor-Bereich robust zu bewegen. Durch die technische Machbarkeitsprüfung können im ersten Schritt, die AMRs selektiert werden, welche die technischen Anforderungen an den

Outdoor-Bereich erfüllen [Cla-2021a]. Die entsprechenden Lösungsvorschläge sind der Tabelle 4-13 zu entnehmen.

Tabelle 4-13: Dekomposition FR_2 im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit

DP ₂ – Technische Machbarkeitsprüfung von Fahrzeugkomponenten und Software					
FR_{21}	Zertifizierte und robuste Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz sicherstellen	DP_{21}	Technischer Eignungstest von Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz	FM_{21}	Mean Time Between Failures (MTBF)
FR_{22}	Robuste und nachhaltige Navigationssoftware für den Outdoor-Bereich sicherstellen	DP_{22}	Hochwertige Umgebungskarten mit robuster und akkurater Lokalisierung	FM_{22}	Verfügbarkeit in Operationsumgebung
FR_{23}	Selbständig in einer dynamischen Umgebung interagieren	DP_{23}	Umweltwahrnehmung und -verständnis durch Sensorik	FM_{23}	Verfügbarkeit in hoch komplexer Umgebung

Aufgrund unterschiedlicher Witterungseinflüsse wie Schnee, Regen, Eis und Nebel müssen die verbauten Komponenten am Roboter robust und witterungsfest sein. Der technische Eignungstest von Fahrzeugkomponenten (DP_{21}) erfüllt FR_{21} und kann mithilfe der MTBF (FM_{21}) funktional überprüft werden. DP_{21} hat keine direkte Beziehung zu einem weiteren FR.

Neben der Hardware spielt die Software eine mindestens genauso entscheidende Rolle. Signale von der Software werden an Aktoren und Sensoren übermittelt. Auf Basis dieser Signale führt der Roboter Aktionen aus, beispielsweise in Form von Geradeausfahren. Damit der Roboter geradeausfahren kann, ist eine hochwertige Umgebungskarte unabdingbar. Hochwertige Umgebungskarten (DP_{22}) haben Auswirkungen auf das selbständige Interagieren in einer dynamischen Umgebung (FR_{23}). Umso genauer die Umgebungskarten, desto selbständiger kann der mobile Roboter in einer dynamischen Umgebung interagieren. Die Wahrnehmung der Umwelt ist somit ein essenzieller Bestandteil der technischen Machbarkeitsprüfung. So muss der AMR seine Umwelt nicht nur auf einer 2D-Ebene wahrnehmen können, sondern auch über eine räumliche Wahrnehmung (3D) verfügen, denn erst mithilfe einer vollständigen Abbildung seiner Umwelt ist der AMR in der Lage, diese vollständig wahrzunehmen und demzufolge auch zu verstehen. Die 2D- und 3D-Wahrnehmung ist zudem eine essenzielle Grundlage für die in Abschnitt 4.6.4 vorgestellte intelligente Planung und Steuerung des AMR. Die zugehörige Design Matrix stellt eine entkoppelte Matrix dar (Gleichung 4-7).

$$\begin{pmatrix} FR_{21} \\ FR_{22} \\ FR_{23} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{21} \\ DP_{22} \\ DP_{23} \end{pmatrix} \quad (4-7)$$

Die vorgeschlagenen Lösungsansätze (DP_{21-23}) sind zu abstrakt, um konkrete Gestaltungsrichtlinien ableiten zu können, daher werden sie in weitere Teilanforderungen zerlegt. DP_{21} lässt sich in die nachfolgenden vier Teilanforderungen untergliedern (Tabelle 4-14).

Tabelle 4-14: Dekomposition FR_{21} im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit

DP_{21} – Technischer Eignungstest von Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz

FR_{211}	Schutz gegen Eindringen von Fremdkörpern und Flüssigkeiten	DP_{211}	Schutzart und Schutzklasse von Komponenten	FM_{211}	IP-Level
FR_{212}	Lebensdauer der verwendeten Materialien	DP_{212}	Eignungsbeurteilung verschiedener Komponenten für den Outdoor-Einsatz	FM_{212}	Leistungsgrenzen der Komponenten
FR_{213}	Zuverlässigkeit der mechanischen Komponenten	DP_{213}	Durchführung von Dauertests	FM_{213}	Ausfallhäufigkeit
FR_{214}	Auswahl der am besten geeigneten Kombination von Hardwarekomponenten	DP_{214}	Klassifizierungsmodell von Fahrzeugkomponenten anhand von Leistungskriterien	FM_{214}	Optimale Lebensdauer anhand vordefinierter Kriterien

Die zugehörige Design Matrix (Gleichung 4-8) ist ebenfalls eine entkoppelte Matrix.

$$\begin{pmatrix} FR_{211} \\ FR_{212} \\ FR_{213} \\ FR_{214} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{211} \\ DP_{212} \\ DP_{213} \\ DP_{214} \end{pmatrix} \quad (4-8)$$

Die IP-Schutzart und Schutzklasse von Komponenten (DP_{211}) gibt Aufschluss über den Schutz gegen das Eindringen von Flüssigkeiten und Fremdkörpern (FR_{211}) der Hardware. Die Schutzart und Schutzklasse wird national in der DIN EN60529 und international in der ISO20653 (für Straßenfahrzeuge) beschrieben [DIN-60529] [ISO-20653]. Für den Einsatz mobiler Roboter im Outdoor-Bereich ist ein IP-Level von IP44 erforderlich. Empfohlen wird jedoch IP65, da das Bauteil dann vor allseitigem Spritzwasser geschützt ist. Erreichen die verbauten Komponenten diese Schutzart und Schutzklasse nicht, so beeinflusst dies die Lebensdauer der verwendeten Materialien (FR_{212}) und reduziert signifikant die Verfügbarkeit des gesamten Systems.

Zudem wirkt sich DP_{211} auf die Zuverlässigkeit der einzelnen mechanischen Komponenten aus (FR_{213}). Liegt beispielsweise das IP-Level unter IP44, dann sind die Komponenten weder gegen das Eindringen von festen Fremdkörpern mit einer Größe über 1 mm noch vor allseitigem Spritzwasser geschützt, was zu erheblichen Auswirkungen auf die Zuverlässigkeit der Komponenten führt. Nach der Eignungsbeurteilung unterschiedlicher Komponenten für den Outdoor-Einsatz (z. B. Sensoren) sind Dauertests der Komponenten durchzuführen, welche zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Auf Basis dieser Ergebnisse sollten die untersuchten Materialien und Komponenten anhand von definierten Leistungskriterien klassifiziert werden, um so die optimale Kombination von Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz ermitteln zu können.

Die Eignungsbeurteilung verschiedener Komponenten für den Outdoor-Einsatz (DP_{212}) lässt sich in weitere Teilanforderungen zerlegen. Tabelle 4-15 fasst die Dekomposition auf vierter Ebene zusammen.

Tabelle 4-15: Dekomposition FR_{212} im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit

DP ₂₁₂ – Eignungsbeurteilung verschiedener Komponenten für den Outdoor-Einsatz					
FR_{2121}	Eignung der verbauten Komponenten	DP_{2121}	Robuste Komponenten	FM_{2121}	Leistungsgrenze der verbauten Komponenten
FR_{2122}	Dauerhaftes Reifenmaterial	DP_{2122}	Abriebfeste Bereifung	FM_{2122}	Leistungsgrenze des Reifenmaterials
FR_{2123}	Betrachtung extremer Temperaturschwankungen	DP_{2123}	Integriertes Wärme- und Kühlsystem	FM_{2123}	Lebensdauer unter extremen Bedingungen

Robuste Komponenten (DP_{2121}) beziehen sich unter anderem auf den Grundrahmen, die Abdeckung, aber auch die Beleuchtung des AMR. Ein Schutz des Transportguts, beispielsweise durch die Anbringung einer Überdachung oder einer robusten Radaufhängung, um auch Unebenheiten auf der Straße abfedern zu können, sind zu berücksichtigen. Daher wirkt sich DP_{2121} auf das Reifenmaterial (FR_{2122}) sowie auf Schwankungen der Temperatur (FR_{2123}) aus. Folglich eignen sich im Outdoor-Bereich insbesondere luftgefüllte Gummireifen mit Profil. Sie bieten die nötige Traktion und sind weniger anfällig auf Spurrillen, die häufig bei der Verwendung von Polyurethanrollen in Verbindung mit hohen Lasten und dem Befahren einer immer gleichbleibenden Fahrroute auftreten.

Ein integriertes Wärme- und Kühlsystem (DP_{2123}) ist vor allem bei der Beheizung und Kühlung der Batterien von Vorteil. Befinden sich die Batteriepakete in einem beheizten Batterietrog, so wirkt sich dies schonend auf die Lebensdauer der Batterien aus. Sind beispielsweise Bedienerbildschirme am AMR verbaut, sollten diese ebenfalls über ein

Wärme- und Kühlsystem verfügen, um vor Überhitzung oder Unterkühlung, je nach Außentemperatur und Sonneneinstrahlung zu schützen. Die Leistungsgrenzen der Komponenten und Materialien (FM_{2121} , FM_{2122}) sowie die Lebensdauer unter extremen Bedingungen (FM_{2123}) stellen hier verlässliche Messgrößen dar.

Diese Abhängigkeiten in der Design Matrix resultieren in einem entkoppelten Design (Gleichung 4-9).

$$\begin{Bmatrix} FR_{2121} \\ FR_{2122} \\ FR_{2123} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{2121} \\ DP_{2122} \\ DP_{2123} \end{Bmatrix} \quad (4-9)$$

Neben robusten Fahrzeugkomponenten spielt auch die Navigationssoftware des Roboters eine entscheidende Rolle für einen stabilen Einsatz im Outdoor-Bereich. Hochwertige Umgebungskarten (DP_{22}) bilden einen essenziellen Bestandteil hierfür. Sie lassen sich in die nachfolgenden drei spezifischeren Teilanforderungen untergliedern (Tabelle 4-16).

Tabelle 4-16: Dekomposition FR_{22} im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit

DP_{22} – Hochwertige Umgebungskarten mit robuster und akkurater Lokalisierung					
FR_{221}	Informationen über den aktuellen Standort senden/empfangen	DP_{221}	Lokalisierungstechnologien	FM_{221}	Genauigkeit der Daten
FR_{222}	Die eigene Position auf einer Karte jederzeit bestimmen	DP_{222}	Detaillierte und synchronisierte Karte	FM_{222}	Abweichung im Vergleich zur realen Position (z. B. +/- 1 m)
FR_{223}	Sensorrauschen vermeiden	DP_{223}	Geeignete Software- und Hardwarelösungen	FM_{223}	Signal-to-noise Ratio (SNR)

Lokalisierungstechnologien (DP_{221}) haben eine Auswirkung auf FR_{222} . Die eigene Position auf der Karte jederzeit bestimmen zu können, hängt von der ausgewählten Lokalisierungstechnologie ab. Gemessen werden kann FR_{221} mithilfe der Genauigkeit der Daten (FM_{221}). Detaillierte und synchronisierte Karten, wie beispielsweise bei SLAM (DP_{222}) hängen vom Sensorrauschen ab. Sensorrauschen bezeichnet die statistische Schwankung zwischen Messwert und realem Wert. Umso stärker das Rauschen eines Sensors, desto ungenauer sind die extrahierten Daten aus den Sensoren. Aufgrund der Abhängigkeiten handelt es sich auch hierbei um eine Triangulärmatrix und demnach um eine entkoppelte Design Matrix (Gleichung 4-10).

$$\begin{Bmatrix} FR_{221} \\ FR_{222} \\ FR_{223} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{221} \\ DP_{222} \\ DP_{223} \end{Bmatrix} \quad (4-10)$$

Lokalisierungstechnologien (DP_{221}) umfassen weitere Teilanforderungen, die der Tabelle 4-17 zu entnehmen sind.

Tabelle 4-17: Dekomposition FR_{221} im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit

DP ₂₂₁ – Lokalisierungstechnologien					
FR_{2211}	Die Position in einem festen Bezugssystem bestimmen	DP_{2211}	GNSS	FM_{2211}	Abweichung vom realen Wert (z. B. +/- 1 m)
FR_{2212}	Die zurückgelegte Strecke ermitteln	DP_{2212}	IMU und Odometrie	FM_{2212}	Genauigkeit der Kalibrierung
FR_{2213}	Die Position relativ zu einer bekannten Position bestimmen	DP_{2213}	Kombination von visuellen Sensoren mit Umgebungsobjekten	FM_{2213}	Robuste Erkennung

Ein GNSS, wie beispielsweise GPS, gibt Aufschluss über die Position des Roboters in einem festen Bezugsrahmen. Gemessen werden kann dies mit der Abweichung des GPS-Signals vom realen Wert mit einer Toleranz von z. B. +/- 1 m. IMUs und Odometrie bestimmen die zurückgelegte Strecke eines Roboters und lassen sich durch die Genauigkeit der Kalibrierung messen (FM_{2212}). Die Bestimmung der Position in Relation zu einer bekannten Position, wie z. B. einer Ladestation, kann mithilfe einer Kombination von visuellen Sensoren, wie Kameras und LiDAR mit Umgebungsobjekten (z. B. QR-Codes und Reflektoren), ermittelt werden.

Die dazugehörige Design Matrix stellt eine ungekoppelte Matrix dar (Gleichung 4-11). Alle drei Lösungsvorschläge können unabhängig voneinander umgesetzt werden. Die Lokalisierungstechnologien können zwar einzeln eingesetzt werden, um jedoch eine höhere Genauigkeit zu erzielen, ist die Kombination der unterschiedlichen Technologien empfehlenswert.

$$\begin{Bmatrix} FR_{2211} \\ FR_{2212} \\ FR_{2213} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{2211} \\ DP_{2212} \\ DP_{2213} \end{Bmatrix} \quad (4-11)$$

Neben DP_{221} kann auch DP_{222} (detaillierte und synchronisierte Karte) in weitere Teilanforderungen zerlegt werden. Tabelle 4-18 listet die Teilanforderungen auf, die sich aus DP_{222} ergeben.

Tabelle 4-18: Dekomposition FR_{222} im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit

DP ₂₂₂ – Detaillierte und synchronisierte Karte					
FR_{2221}	Roboterposition kalibrieren	DP_{2221}	Definition von Rücksetzpositionen (z. B. Start- und Zielposition)	FM_{2221}	Genauigkeit von bekannten Positionen
FR_{2222}	Karte kontinuierlich aktualisieren	DP_{2222}	SLAM-Algorithmen	FM_{2222}	Aktualisierungsfrequenz
FR_{2223}	Mögliche Fahrbereiche eingrenzen	DP_{2223}	Definition von Fahr- und Sperrbereichen auf der Karte	FM_{2223}	Eindeutige Grenzen

Die Definition von Rücksetzpositionen, beispielsweise der Start- und Zielposition des Roboters (DP_{2221}) hat keine direkte Beziehung zu FR_{2222} . Als Messgröße dient hier die Genauigkeit bekannter Positionen (FM_{2221}). Das kontinuierliche Aktualisieren der Karte wird mithilfe von SLAM-Algorithmen (DP_{2222}) erreicht. Unabhängig davon können durch definierte Fahr- und Sperrbereiche auf der Karte (DP_{2223}) mögliche Aktionsbereiche eingegrenzt (FR_{2223}) werden. Sperrbereiche auf einem Werksgelände können z. B. Feuerwehruzufahrten, Notausgänge oder Pausenbereiche für Mitarbeiter sein.

Auch diese Design Matrix (Gleichung 4-12) zeigt eine ungekoppelte Matrix.

$$\begin{Bmatrix} FR_{2221} \\ FR_{2222} \\ FR_{2223} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{2221} \\ DP_{2222} \\ DP_{2223} \end{Bmatrix} \quad (4-12)$$

Sensorrauschen kann sowohl software- als auch hardwareseitig reduziert werden, daher wird DP_{223} in weitere Teilanforderungen untergliedert. Tabelle 5-19 zeigt die vorgeschlagenen Lösungsparameter und Metriken.

Tabelle 4-19: Dekomposition FR_{223} im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit

DP ₂₂₃ – Geeignete Software- und Hardwarelösungen					
FR_{2231}	Geeignete Softwarelösung für die Reduzierung von Sensorrauschen	DP_{2231}	Sensorauswertung mit geeigneten Algorithmen	FM_{2231}	Abweichung zum realen Wert (z. B. +/- 1 m)
FR_{2232}	Geeignete Hardwarelösung für die Reduzierung von Sensorrauschen	DP_{2232}	Einbau redundanter Sensorik	FM_{2232}	Störanfälligkeit der Sensoren in Bezug auf externe Einflüsse

Sensoren liefern zunächst Rohdaten, die von der Central Processing Unit (CPU) im Roboter gefiltert, sortiert und ausgewertet werden müssen. Nicht alle Rohdaten haben denselben qualitativen Informationsgehalt und nicht alle sind verwertbar. Daher sollte

die Sensorauswertung mit geeigneten Algorithmen (DP_{2231}), wie beispielsweise Kalman-Filtern oder Infinite Impulse Response (IIR)-Filtern, durchgeführt werden. Beide Filter sind in der Lage, Sensorrauschen zu reduzieren [Her-2012, S. 150ff.].

Wie Gleichung 4-13 zu entnehmen ist, hat DP_{2231} keinen direkten Einfluss auf FR_{2232} . Eine geeignete Hardwarelösung für die Reduzierung von Sensorrauschen stellt beispielsweise der Einbau redundanter Sensoren (DP_{2232}) dar. Ein Sensor allein liefert nicht immer alle notwendigen Informationen, die für eine robuste Navigation notwendig sind. Die Kopplung und gegenseitige Absicherung unterschiedlicher Sensoren ermöglichen hingegen eine höhere Genauigkeit und somit eine robustere Navigation. DP_{2232} kann mithilfe der Störanfälligkeit der Sensoren in Bezug auf externe Einflüsse (FM_{2232}) gemessen werden.

Das Ergebnis ist ebenfalls eine ungekoppelte Design Matrix. Auch hier gilt es zu erwähnen, dass eine Kombination aus Software- und Hardwarelösung für die Reduzierung von Sensorrauschen von Vorteil sein kann.

$$\begin{Bmatrix} FR_{2231} \\ FR_{2232} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{2231} \\ DP_{2232} \end{Bmatrix} \quad (4-13)$$

Die letzte Dekomposition im zweiten Gestaltungsfeld bildet DP_{23} (Umweltwahrnehmung und -verständnis durch Sensorik). Diese Lösung lässt sich in drei weitere Teilanforderungen untergliedern (Tabelle 4-20).

Tabelle 4-20: Dekomposition FR_{23} im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit

DP ₂₃ – Umweltwahrnehmung und -verständnis durch Sensorik					
FR_{231}	Ausreichende Informationen aus den Sensoren erhalten	DP_{231}	Daten von Kameras und Laserscannern (2D/3D)	FM_{231}	Dichte der Punktwolke
FR_{232}	Sensordaten verarbeiten	DP_{232}	Sensorfusion	FM_{232}	Ergebnisqualität
FR_{233}	Auf unterschiedliche Szenarien reagieren	DP_{233}	Definition von Reaktionsszenarien basierend auf der Umgebung	FM_{233}	Reaktionsfähigkeit

Die Wahrnehmung der Umwelt ist neben der Hardware und Software ein essenzieller Bestandteil der technischen Machbarkeitsprüfung. Ausreichende Informationen aus den Sensoren (FR_{231}) können mit Daten von Kameras und Laserscannern (DP_{231}) sichergestellt werden. DP_{231} hat einen Einfluss auf FR_{232} , da die Rohdaten aus den Sensoren zunächst keinen Mehrwert für die Wahrnehmung und das Verständnis des Ro-

boters aufweisen. Erst wenn die Daten durch Sensorfusion verarbeitet werden, entstehen verwertbare Informationen für die Wahrnehmung und das Verständnis. DP_{231} hat ebenfalls Einfluss auf die Art der Reaktion auf unterschiedliche Szenarien (FR_{233}). Erst die Daten und anschließende Sensorfusion ermöglichen dem Roboter, angemessen auf unterschiedliche Szenarien in seiner Umwelt zu reagieren. Daraus ergibt sich ebenfalls eine Beziehung von DP_{232} und FR_{233} .

Die Definition von Reaktionsszenarien basierend auf der Umgebung (DP_{233}) beinhaltet z. B. das Reagieren des Roboters auf unvorhersehbare Ereignisse, wie das plötzliche Anhalten eines Fahrzeugs auf der Fahrbahn, das Ausweichen, Überholmanöver oder Fußgängern und Radfahrern den Vortritt zu gewähren.

Gleichung 4-14 zeigt die Beziehungen in Form einer entkoppelten Design Matrix.

$$\begin{Bmatrix} FR_{231} \\ FR_{232} \\ FR_{233} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{231} \\ DP_{232} \\ DP_{233} \end{Bmatrix} \quad (4-14)$$

4.6.3 Gestaltungsfeld 3 – Sicherheitsmanagement

Um sicherzustellen, dass Personen geschützt sind und Kollisionen vermieden werden, ist ein umfassendes Sicherheitssystem unabdingbar. Dieses umfassende Sicherheitssystem (DP_3) lässt sich in weitere Teilanforderungen untergliedern. Zunächst muss sichergestellt werden, dass keine Gefahr vom AMR ausgeht (FR_{31}). Anschließend müssen alle sicherheitsrelevanten Aspekte des AMR zusammengetragen, aufbereitet und den Anwendern transparent zur Verfügung gestellt werden (FR_{32}). Zuletzt sollten relevante Personengruppen über die Sicherheit des AMR informiert und geschult werden (FR_{33}). Tabelle 4-21 fasst die Teilanforderungen, deren Lösungsvorschläge und Metriken zusammen.

Tabelle 4-21: Dekomposition FR_3 im Gestaltungsfeld 3 – Sicherheitsmanagement

DP ₃ – Umfassendes Sicherheitssystem					
FR_{31}	Sicherstellen, dass keine Gefahr vom AMR ausgeht	DP_{31}	Systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen	FM_{31}	Anzahl der als Gefahr erkannten Situationen
FR_{32}	Sicherheitsrelevante Aspekte des AMR zusammentragen	DP_{32}	Sicherheitsdokumentation	FM_{32}	Vollständigkeit der Dokumente
FR_{33}	Relevante Personengruppen über die Sicherheit und Funktionalität des AMR unterweisen	DP_{33}	Sicherheitsunterweisung	FM_{33}	Anzahl der unterwiesenen Personen

Wie aus Gleichung 4-15 ersichtlich wird, wirkt sich die systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen (DP₃₁) auf das Zusammentragen sicherheitsrelevanter Aspekte des AMR (FR₃₂) sowie auf das Unterweisen relevanter Personengruppen aus (FR₃₃). Zudem hat DP₃₂ eine Beziehung zu FR₃₃. Denn erst mit einer soliden Sicherheitsdokumentation ist es möglich, entsprechende Personengruppen über die Sicherheit des AMR zu unterweisen und Sicherheitsunterweisungen durchzuführen.

Die entsprechenden Personengruppen bestehen in der Regel aus den Betreibern des AMR, der Arbeitssicherheit, der Werksfeuerwehr, dem Betriebsrat, den Prozess- und Strukturverantwortlichen, der IT, der Instandhaltung, den Betreibern des vor- und nachgelagerten Prozesses und den Mitarbeitern in der Produktion sowie gegebenenfalls auch Dienstleistern und externen Partnern. Empfohlen wird die Einbindung relevanter Personengruppe bereits zu Beginn einer Implementierung, um unter anderem Akzeptanz zu schaffen. In einzelnen Implementierungsphasen sind einige Personengruppen stärker involviert, z. B. die Arbeitssicherheit, wohingegen der Betriebsrat nur zu Beginn informiert wird und seine Zustimmung erteilen muss. Die Sicherheitsunterweisung sowie jegliche Art von Schulungsmaterialien sollten ebenfalls dokumentiert werden.

Die Design Matrix stellt eine entkoppelte Matrix dar (Gleichung 4-15).

$$\begin{Bmatrix} FR_{31} \\ FR_{32} \\ FR_{33} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{31} \\ DP_{32} \\ DP_{33} \end{Bmatrix} \quad (4-15)$$

Die systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen (DP₃₁) umfasst einen weiteren Bereich, welcher wiederum spezifiziert werden kann. Tabelle 4-22 zeigt die fünf Teilanforderungen, die sich aus DP₃₁ auf der dritten Dekompositionsebene ergeben.

Tabelle 4-22: Dekomposition FR₃₁ im Gestaltungsfeld 3 – Sicherheitsmanagement

DP ₃₁ – Systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen					
FR ₃₁₁	Sicherheitsrichtlinien und Normen einhalten	DP ₃₁₁	CE-Kennzeichnung	FM ₃₁₁	Erfüllungsgrad
FR ₃₁₂	Betrieb auch bei Ausfall des AMR sicherstellen	DP ₃₁₂	Notfallprozess/-strategie	FM ₃₁₂	Verfügbarkeit
FR ₃₁₃	Verschmutzung und Emissionen des AMR reduzieren	DP ₃₁₃	Prüfung der Anforderungen an den Umweltschutz	FM ₃₁₃	Ausgestoßene Schadstoffe

<i>FR</i> ₃₁₄	Datentransfer zum AMR sicherstellen	<i>DP</i> ₃₁₄	Stabile Netzwerkverbindung	<i>FM</i> ₃₁₄	Menge an Datenverlust
<i>FR</i> ₃₁₅	Störungen am AMR frühzeitig erkennen	<i>DP</i> ₃₁₅	Fehlermeldesystem	<i>FM</i> ₃₁₅	Meldegeschwindigkeit

Die CE-Kennzeichnung (*DP*₃₁₁) richtet sich in Europa nach der Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) [Kli-2007]. Sie dokumentiert, dass alle relevanten Sicherheitsvorschriften und Normen beim Bau des mobilen Roboters eingehalten wurden. In anderen Ländern, wie beispielsweise den USA und Kanada, gelten die Vorschriften der Underwriters Laboratories (UL), die ebenfalls eine Kennzeichnung darstellt [Und-2021]. Sie beruht auf den Normen ISO9001 und ISO14001 [ISO-9001] [ISO-14001].

Nachdem die CE-Kennzeichnung vergeben ist, sind Notfallprozesse und -strategien (*DP*₃₁₂) abzuleiten. Sie stellen sicher, dass bei einem technischen Versagen des AMR (*FR*₃₁₂) der Prozess trotzdem bedient werden kann. Häufig werden Prozesse dann manuell übernommen. An dieser Stelle ist es wichtig, insbesondere für kritische Situationen, wie etwa dem Abriss der Versorgungslinie, Notfallprozesse vordefiniert und dokumentiert zu haben, um möglichst schnell und strukturiert reagieren zu können.

*DP*₃₁₃ stellt einen Lösungsvorschlag für das Reduzieren der Verschmutzung und der Emissionen eines AMR (*FR*₃₁₃) dar, z. B. in Bezug auf die Antriebstechnologie (Verbrennungsmotoren vs. batterieelektrischer Antrieb vs. Brennstoffzellenantrieb). Gemessen werden kann dies mithilfe der ausgestoßenen Schadstoffe (*FM*₃₁₃).

Eine stabile Netzwerkverbindung (*DP*₃₁₄) wirkt sich auf das frühzeitige Erkennen von Störungen (*FR*₃₁₅) aus. Dabei eignet sich eine WLAN-Anbindung nur bedingt für AMRs im Outdoor-Bereich. Vielversprechender sind heutzutage 5G-Netze, sie können werksspezifisch In- und Outdoor installiert werden und ermöglichen eine deutlich höhere Übertragungsrate bei sehr kurzen Latenzzeiten. Denn erst wenn das Netzwerk stabil ist und ohne häufigen „Handover“/Zellenwechsel auskommt, können Daten, z. B. auch in Form von Störmeldungen, an ein Fehlermeldesystem (*DP*₃₁₅) übertragen werden.

Gleichung 4-16 fasst die Beziehungen in Form einer entkoppelten Design Matrix zusammen.

$$\begin{pmatrix} FR_{311} \\ FR_{312} \\ FR_{313} \\ FR_{314} \\ FR_{315} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{311} \\ DP_{312} \\ DP_{313} \\ DP_{314} \\ DP_{315} \end{pmatrix} \quad (4-16)$$

Auch DP_{32} kann in weitere Teilanforderungen zerlegt werden. Die Sicherheitsdokumentation sollte Aufschluss über Gefahrenstellen am AMR (FR_{321}) sowie potenziellen Gefahrenstellen in der Umgebung (FR_{322}) geben. Zudem ist eine Dokumentation der Sicherheitseinrichtungen (FR_{323}) empfehlenswert. Mögliche Lösungsparameter dieser Teilanforderungen sowie deren FMs können der Tabelle 4-23 entnommen werden.

Tabelle 4-23: Dekomposition FR_{32} im Gestaltungsfeld 3 – Sicherheitsmanagement

DP ₃₂ – Sicherheitsdokumentation				
FR_{321}	Gefahrenstellen am AMR identifizieren	DP_{321}	Risikobeurteilung	FM_{321} Wahrscheinlichkeit der Gefahren am AMR
FR_{322}	Potenzielle Gefahrenstellen in der Umgebung beseitigen	DP_{321}	Gefährdungsbeurteilung	FM_{322} Wahrscheinlichkeit der Gefahren in der Umgebung
FR_{323}	Sicherstellen robuster Sicherheitseinrichtungen	DP_{323}	Funktionstests von Sicherheitseinrichtungen	FM_{323} Verfügbarkeit

Die Risikobeurteilung (DP_{321}) ist der Kern der Sicherheitsdokumentation und vom Hersteller zu erstellen. Sie stellt sicher, dass alle Gefahrenstellen am AMR (FR_{321}) vollständig beschrieben und dokumentiert sind. DP_{321} hat eine Beziehung zu FR_{322} . Die Risikobeurteilung zeigt auch die Grenzen des AMR, wie beispielsweise das Fahren auf vereisten Straßen, auf. Ebenfalls beinhaltet die Risikobeurteilung die Beschreibung der verbauten Sicherheitseinrichtungen und deren Leistung. Daher besteht auch eine Verbindung zwischen DP_{321} und FR_{323} . Die Gefährdungsbeurteilung (DP_{321}) ist vom Anwender durchzuführen. Je nach Arbeitsstätte und Arbeitsmitteln können unterschiedliche Gefahren auftreten. Demnach richtet sich die Gefährdungsbeurteilung nach werksspezifischen Verordnungen und Vorschriften, beispielsweise in Bezug auf Arbeitsschutz- oder Betriebssicherheitsverordnungen.

Zuletzt sollte die Funktionalität der verbauten Sicherheitseinrichtungen in Form von Funktionstests (DP_{323}) dokumentiert werden. Gegebenenfalls sind noch weitere Doku-

mentationen anzufertigen, welche auf Wunsch des Anwenders für eine Implementierung vorliegen müssen, z. B. die Dokumentation nach ISO13849 (SISTEMA), die sich primär auf die Gestaltung und Integration sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen bezieht [ISO-13849-1].

Gleichung 4-17 zeigt die daraus resultierende entkoppelte Design Matrix.

$$\begin{Bmatrix} FR_{321} \\ FR_{322} \\ FR_{323} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{321} \\ DP_{322} \\ DP_{323} \end{Bmatrix} \quad (4-17)$$

4.6.4 Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement

Damit ein mobiler Roboter in der Lage ist, selbständig Aufgaben und Aufträge planen und steuern zu können (FR_4), muss er über ein intelligentes Planungs- und Steuerungssystem (DP_4) verfügen. Wie in Abschnitt 2.1.4 bereits vorgestellt, lässt sich die Autonomie nicht nur in Stufen, sondern auch in Aufgabenebenen unterteilen. Um intelligent planen und steuern zu können, ist ein gewisser Grad an Autonomie und somit auch Entscheidungshoheit von Vorteil. Tabelle 4-24 zeigt die Teilanforderungen von DP_4 .

Tabelle 4-24: Dekomposition FR_4 im Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement

DP ₄ – Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem					
FR_{41}	Sich auf lokaler Ebene selbständig organisieren	DP_{41}	Dezentrale Planung und Steuerung	FM_{41}	Häufigkeit menschlicher Eingriffe
FR_{42}	Globale Informationen bereitstellen	DP_{42}	Zentrale Statusüberwachung	FM_{42}	Koordinationsaufwand

Ein intelligentes Planungs- und Steuerungssystem ist das Herzstück eines autonom agierenden mobilen Roboters. Die Anforderung an den AMR, sich auf lokaler Ebene selbständig organisieren zu können (FR_{41}), kann mithilfe einer dezentralen Planung und Steuerung umgesetzt werden (DP_{41}). Die messbare Zielgröße ist hierfür die Häufigkeit menschlicher Eingriffe in das System (FM_{41}). Innerhalb eines dezentral geplanten Systems kann jeder AMR die optimale Entscheidung bzw. Lösung für sich finden. Lösungen zugunsten des Gesamtsystems können jedoch von einem dezentral geplanten System nur bedingt umgesetzt werden, da es ihm an der Bereitstellung globaler Informationen fehlt (FR_{42}) [Bes-2017, S. 6f.]. Daraus lässt sich ein weiterer Lösungsparameter ableiten: die zentrale Statusüberwachung (DP_{42}).

Gleichung 4-18 zeigt die Design Matrix. Da keine direkte Beziehung zwischen DP_{41} und FR_{42} besteht, handelt es sich um eine ungekoppelte Matrix.

$$\begin{Bmatrix} FR_{41} \\ FR_{42} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{41} \\ DP_{42} \end{Bmatrix} \quad (4-18)$$

Damit eine dezentrale Planung und Steuerung (DP_{41}) umgesetzt werden kann, müssen dem AMR zunächst Informationen zur Verfügung gestellt werden (FR_{411}), beispielsweise in Form einer Aufgabe bzw. eines Auftrags, welcher unter anderem Start- und Zielpunkt oder Informationen zur Strecke beinhaltet. Dabei geht es nicht primär um die Quantität der Informationen, sondern um die Qualität. Die Anbindung an die Dateninfrastruktur, wie z. B. an ein Manufacturing Execution System (MES), Enterprise-Resource-Planning System (ERP) oder ein Fehlermeldesystem (DP_{411}) dienen hierbei als mögliche Informationsquelle. Anfangs sind die Informationen ein Teil des Auftrags, später können sie zusätzlich von einer Internet of Things (IoT)-Plattform zur Verfügung gestellt werden. Folglich besteht eine Beziehung zwischen DP_{411} und der flexiblen und selbständigen Entscheidungsfindung auf lokaler Ebene (FR_{413}). Die hohe Interaktion zwischen unabhängigen Systemelementen (DP_{412}) ermöglicht das Kommunizieren und Interagieren mit der Umwelt (FR_{412}). DP_{412} wirkt sich zudem auf FR_{413} und die Anpassung an ungeplante und externe Einflussfaktoren (FR_{414}) aus, da für die Entscheidungsfindung und Anpassung eine Interaktion zwischen unabhängigen Systemelementen von Vorteil ist.

Eine weitere Teilanforderung der dezentralen Planung und Steuerung ist die dezentralisierte Entscheidungsfindung (DP_{413}). DP_{413} wirkt sich ebenfalls auf FR_{414} aus. Um sich an die sich ständig verändernde Umwelt anpassen zu können, muss ein AMR in der Lage sein, eigene Entscheidungen treffen zu können. Autonom agierende Systeme oder agentenbasierte Systeme, wie z. B. autonome Kommissionierroboter, können als ein Teil der dezentralen Planung und Steuerung gesehen werden. Sie können sich selbständig an unterschiedliche Umgebungsbedingungen anpassen (FR_{414}). Gemessen werden kann diese selbständige Anpassung mithilfe des Autonomiegrads. Tabelle 4-25 fasst die Dekomposition zusammen.

Tabelle 4-25: Dekomposition FR_{41} im Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement

DP ₄₁ – Dezentrale Planung und Steuerung				
FR_{411}	Über Informationen verfügen	DP_{411}	Anbindung an die Dateninfrastruktur	FM_{411} Qualität verfügbarer Informationen
FR_{412}	Mit der Umwelt kommunizieren und interagieren	DP_{412}	Hohe Interaktion zwischen unabhängigen Systemelementen	FM_{412} Konnektivitätsgrad

FR_{413}	Flexible und selbständige Entscheidungsfindung auf lokaler Ebene	DP_{413}	Dezentralisierte Entscheidungsfindung	FM_{413}	Flexibilität/Abhängigkeit
FR_{414}	Selbständige Anpassung an ungeplante und externen Einflussfaktoren	DP_{414}	Autonom agierende Systeme	FM_{414}	Autonomiegrad

Es handelt sich um eine entkoppelte Design Matrix (Gleichung 4-19).

$$\begin{pmatrix} FR_{411} \\ FR_{412} \\ FR_{413} \\ FR_{414} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 \\ 0 & X & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{411} \\ DP_{412} \\ DP_{413} \\ DP_{414} \end{pmatrix} \quad (4-19)$$

Die dezentralisierte Entscheidungsfindung (DP_{413}) lässt sich nochmals in drei Teilanforderungen zerlegen. Der AMR muss für die Entscheidungsfindung zunächst die Situation verstehen (FR_{4131}), anschließend eine Entscheidung treffen (FR_{4132}) und zuletzt aus seinen Handlungen lernen (FR_{4133}). Dabei kann das Konfidenzintervall¹⁴ (FM_{4131}) als Metrik für die Einschätzung der verstandenen Situation des Roboters verwendet werden. Eine mögliche Lösung für das „Verstehen“, wie eine Aufgabe zu lösen ist und wie daraus gelernt werden kann, bieten kognitive Fähigkeiten (DP_{4131}). Kognition ist die geistige Wahrnehmung. Nach Hayes besteht diese geistige Wahrnehmung aus fünf Fähigkeiten: Wahrnehmung der Umwelt, Aufmerksamkeit auf spezielle Geschehen, Nachdenken, Speicherung der Informationen für spätere Erinnerungen und Zuweisung von Bedeutungen [Ban-1995, S. 11ff.]. Auf Basis dieser Fähigkeiten ist der AMR in der Lage, Entscheidungen selbständig zu treffen. Aufgrund dessen besteht ebenfalls eine Beziehung zwischen DP_{4131} und FR_{4132} sowie FR_{4133} .

Die Entscheidungsfähigkeit basierend auf KI (DP_{4132}) ermöglicht eine selbständige Entscheidungsfindung (FR_{4132}). Auf Basis dieser selbständigen Entscheidungsfindung kann der AMR aus seinem Handeln lernen (FR_{4133}), beispielsweise durch das Reinforcement Learning, bei dem der Roboter aus seinen Handlungen mithilfe eines Belohnungsmechanismus lernt. Tabelle 4-26 fasst diese Dekomposition zusammen.

¹⁴ Ein Konfidenzintervall (Vertrauensbereich) ist „ein aus Stichprobenwerten berechnetes [d. h. in Lage und Breite zufälliges] Intervall, das den wahren aber unbekannt Parameter mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit, der Vertrauenswahrscheinlichkeit, überdeckt“ [Hed-2016, S. 334].

Tabelle 4-26: Dekomposition FR_{413} im Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement

DP ₄₁₃ – Dezentralisierte Entscheidungsfindung					
FR_{4131}	Situationen verstehen	DP_{4131}	Kognitive Fähigkeiten	FM_{4131}	Konfidenzintervall
FR_{4132}	Entscheidungen selbständig treffen	DP_{4132}	Entscheidungsfähigkeit basierend auf KI	FM_{4132}	Häufigkeit menschlicher Eingriffe
FR_{4133}	Aus Handlungen lernen	DP_{4133}	Maschinelles Lernen	FM_{4133}	Qualität der Trainingsdaten

Aufgrund der Beziehungen zwischen FRs und DPs, ergibt sich eine Triangularmatrix und somit eine entkoppelte Design Matrix (Gleichung 4-20),

$$\begin{pmatrix} FR_{4131} \\ FR_{4132} \\ FR_{4133} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{4131} \\ DP_{4132} \\ DP_{4133} \end{pmatrix} \quad (4-20)$$

Neben der dezentralen Planung und Steuerung auf lokaler Ebene ist das Bereitstellen globaler Informationen (FR_{42}) eine weitere relevante Anforderung für ein intelligentes Planungs- und Steuerungssystem (DP_4). Eine mögliche Lösung stellt die zentrale Statusüberwachung dar (DP_{42}). Sie lässt sich wiederum in weitere FRs zerlegen. Tabelle 4-27 zeigt die dritte Dekompositionsebene von FR_{42} .

Tabelle 4-27: Dekomposition FR_{42} im Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement

DP ₄₂ – Zentrale Statusüberwachung					
FR_{421}	Ad hoc auf globale Ereignisse reagieren	DP_{421}	Globale Echtzeit-Informationen über die Umgebung sammeln	FM_{421}	Überwachungsreichweite
FR_{422}	Koordinieren globaler Informationen	DP_{422}	Globaler Koordinator	FM_{422}	Planungsdauer/Planungsgenauigkeit
FR_{423}	Bereitstellen globaler Informationen	DP_{423}	Globale Echtzeit-Informationen über die Umgebung übermitteln	FM_{423}	Kommunikationsreichweite

Globale Echtzeit-Informationen (DP_{421}) ermöglichen Ad-hoc-Reaktionen auf Ereignisse in der Umgebung (FR_{421}). Je mehr globale Informationen aus der Umgebung einem globalen Koordinator bekannt sind, desto mehr Informationen kann er an die einzelnen dezentral gesteuerten AMRs weitergeben (FR_{422} , FR_{423}). Ähnlich wie bei einem Navigationssystem, das die optimale Route für einen Fahrer bestimmt. Treten Staus oder Verkehrsbehinderungen auf dieser Strecke auf, werden sie dem Fahrer in Echtzeit mitgeteilt und eine Alternativroute vorgeschlagen. Dabei entscheidet der Fah-

rer selbst, ob er diese Alternativroute wählt oder nicht. Diese Art von globaler Koordination kann auch für die Planung und Steuerung einer AMR-Flotte verwendet werden (DP₄₂₂). Der globale Koordinator (DP₄₂₂) entscheidet nicht einzeln über die AMRs, er fungiert vielmehr als eine übergeordnete Koordinationseinheit und stellt sicher, dass Entscheidungen zugunsten des Gesamtsystems getroffen werden. Mithilfe der Kommunikationsreichweite (FM₄₂₃) kann das Bereitstellen globaler Informationen (FR₄₂₃) quantifiziert werden. Je größer die Kommunikationsreichweite, desto mehr globale Echtzeit-Informationen über die Umgebung können an die AMRs übermittelt werden (DP₄₂₃). Daraus resultiert eine entkoppelte Design Matrix (Gleichung 4-21).

$$\begin{Bmatrix} FR_{421} \\ FR_{422} \\ FR_{423} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{421} \\ DP_{422} \\ DP_{423} \end{Bmatrix} \quad (4-21)$$

4.6.5 Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit

Die Anforderungen an die Bewertung der wirtschaftlichen Effizienz für den Einsatz von AMRs auf dem Werksgelände (FR₅) sind ein Kernbestandteil für die Entscheidung zur Einführung dieser Systeme. Ist die wirtschaftliche Effizienz nicht gegeben, ist in der Regel aus Sicht der Unternehmen eine Implementierung nicht umsetzbar. Mit Effizienz ist die Beurteilung der Beziehung zwischen der erbrachten Leistung und dem Ressourceneinsatz gemeint [Tho-2020, S. 47]. Daher ist es umso wichtiger, die einzelnen Anforderungen, welche sich aus der Kostenanalyse (DP₅) ergeben, systematisch aufzubrechen. Die nachfolgende Tabelle 4-28 zeigt die Dekomposition von FR₅ nach dem Top-Down-Prinzip.

Tabelle 4-28: Dekomposition FR₅ im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit

DP ₅ – Kostenanalyse					
FR ₅₁	Kosten für den AMR aufschlüsseln	DP ₅₁	Kostenaufstellung für den AMR	FM ₅₁	Transparenz
FR ₅₂	Kosten für den manuellen Referenzprozess aufschlüsseln	DP ₅₂	Kostenaufstellung für den manuellen Referenzprozess	FM ₅₂	Transparenz
FR ₅₃	Finanzielle Vorteilhaftigkeit der beiden Investitionen ermitteln	DP ₅₃	Investitionsrechenverfahren	FM ₅₃	Rentabilität

Im ersten Schritt sollten die Kosten, welche ein AMR verursacht, aufgeschlüsselt werden (FR₅₁). Diese Anforderung kann mithilfe einer Kostenaufstellung für den AMR (DP₅₁) erfüllt werden. Es folgt die Darlegung der Kosten für den manuellen Referenzprozess (FR₅₂). Auch hier dient eine Kostenaufstellung als Ausgangsbasis (DP₅₂).

Wenn beide Kostenaufstellungen durchgeführt worden sind, sollte die finanzielle Vorteilhaftigkeit beider Investitionen ermittelt werden (FR_{53}). Von einer Investition wird dann gesprochen, wenn Kapital langfristig in materielle oder immaterielle Vermögensverhältnisse gebunden wird [Erm-2016, S. 29ff.]. Um FR_{53} zu erfüllen, eignet sich ein Investitionsrechenverfahren (DP_{53}). Die Messgröße für die Ermittlung der finanziellen Vorteilhaftigkeit (FR_{53}) liefert die Rentabilität (FM_{53}). Da DP_{51} und DP_{52} in die Ermittlung der finanziellen Vorteilhaftigkeit einfließen, handelt es sich um eine entkoppelte Design Matrix (Gleichung 4-22).

$$\begin{Bmatrix} FR_{51} \\ FR_{52} \\ FR_{53} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{51} \\ DP_{52} \\ DP_{53} \end{Bmatrix} \quad (4-22)$$

DP_{51} lässt sich in weitere Teilanforderungen zerlegen, wie die nachfolgende Tabelle 4-29 zeigt.

Tabelle 4-29: Dekomposition FR_{51} im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit

DP_{51} – Kostenaufstellung für den AMR

FR_{511}	Einmalige Kosten des AMR erfassen	DP_{511}	Computergestütztes Tool für die einmaligen Kosten des AMR	FM_{511}	Transparenz
FR_{512}	Laufende Kosten des AMR schätzen	DP_{512}	Computergestütztes Tool für die laufenden Kosten des AMR	FM_{512}	Transparenz

Die Kostenaufstellung (DP_{51}) sollte zum einen einmalige Kosten (FR_{511}) und zum anderen laufende Kosten (FR_{512}) beinhalten. Beide Kostenarten lassen sich mithilfe eines computergestützten Tools, wie beispielsweise *Microsoft Excel*, übersichtlich darstellen. Wobei ein Bereich des Tools ausschließlich die einmaligen Kosten (DP_{511}) und der andere die laufenden Kosten (DP_{512}) aufzeigen sollte. Eine direkte Beziehung von einem DP zu einem weiteren FR liegt nicht vor, daher ist die Design Matrix ungekoppelt (Gleichung 4-23).

$$\begin{Bmatrix} FR_{511} \\ FR_{512} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{511} \\ DP_{512} \end{Bmatrix} \quad (4-23)$$

Tabelle 4-30 fasst die Teilanforderungen an das computergestützte Tool für die Einmalkosten des AMR (DP_{511}) zusammen.

Tabelle 4-30: Dekomposition FR_{551} im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit

DP ₅₁₁ – Computergestütztes Tool für die einmaligen Kosten des AMR				
FR_{5111}	Anschaffungskosten erfassen	DP_{5111}	Eingabefunktion für die Anschaffungskosten	FM_{5111} Transparenz
FR_{5112}	Kosten für die Inbetriebnahme erfassen	DP_{5112}	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Inbetriebnahme	FM_{5112} Transparenz
FR_{5113}	Kosten für die Infrastrukturanpassung erfassen	DP_{5113}	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Infrastrukturanpassung	FM_{5113} Transparenz

Neben der Eingabefunktion für die Anschaffungskosten des AMR (DP_{5111}) sollte zudem eine Eingabefunktion mit einem Richtwert für die Kosten der Inbetriebnahme (DP_{5112}) und für die Kosten der Infrastrukturanpassungen (DP_{5113}) berücksichtigt werden. Die beiden Richtwerte sind Teil der zuvor ermittelten Anschaffungskosten (DP_{5111}).

Inbetriebnahmekosten beinhalten alle Aufwendungen die nach der Montage einer Maschine zur Herstellung der vereinbarten Betriebsfähigkeit anfallen [Bor-2009, S. 1]. Hierzu zählen vor allem die Erstkalibrierung des Roboters in seiner Umgebung, das sogenannte „*teach-in*“ der Karte sowie die Anbindung an externe Systeme (Lagerverwaltungssystem, ERP, etc.). Nach *Weber* liegen die Gesamtkosten der Inbetriebnahme zwischen 5 und 20 % der Anschaffungskosten [Web-2016, S. 240].

Infrastrukturkosten beinhalten unter anderem die Installation der Ladestation, gegebenenfalls Verlegung von Stromleitungen, die Anbringung von Ampeln und Verkehrsschildern, Sicherheitsmaßnahmen, wie Markierungen auf der Fahrbahn, die Erstanbindung an die IT-Infrastruktur, Kommunikationsschnittstellen mit Toreinfahrten oder Dock-Toren oder die Anbringung von Referenzpunkten (z. B. Reflektoren oder QR-Codes) in der Umgebung.

Aufgrund der Beziehungen von DP_{5111} zu FR_{5112} und FR_{5113} handelt es sich um eine entkoppelte Design Matrix (Gleichung 4-24).

$$\begin{Bmatrix} FR_{5111} \\ FR_{5112} \\ FR_{5113} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{5111} \\ DP_{5112} \\ DP_{5113} \end{Bmatrix} \quad (4-24)$$

Neben den Einmalkosten (DP_{511}) lassen sich auch die laufenden Kosten (Betriebskosten) eines AMR (DP_{512}) in weitere Teilanforderungen zerlegen. Betriebskosten sind all jene Kosten, die durch die Aufrechterhaltung des operativen Geschäftsbetriebs eines

Unternehmens verursacht werden. Diese lassen sich wiederum in fixe (FR_{5121}) und variable Kosten (FR_{5122}) unterteilen. Zu den variablen Kosten gehören unter anderem Material-, Energie- sowie Fracht- und Transportkosten. Fixe Betriebskosten sind dadurch charakterisiert, dass sie konstant sind. Hierzu zählen z. B. Kosten für fixe Löhne und Gehälter, Mietkosten, Kosten für lineare Abschreibungen oder Versicherungskosten [Tho-2020, S. 287]. Tabelle 4-31 zeigt mögliche Lösungsparameter für FR_{5121} und FR_{5122} sowie die dazugehörigen FMs.

Tabelle 4-31: Dekomposition FR_{512} im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit

DP ₅₁₂ – Computergestütztes Tool für die laufenden Kosten eines AMR				
FR_{5121}	Fixe Kosten ermitteln	DP_{5121}	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die fixen Kosten	FM_{5121} Transparenz
FR_{5122}	Variable Kosten ermitteln	DP_{5122}	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die variablen Kosten	FM_{5122} Transparenz

Das Unabhängigkeitsaxiom wird vollumfänglich erfüllt, daher liegt eine ungekoppelte Design Matrix vor (Gleichung 4-25).

$$\begin{Bmatrix} FR_{5121} \\ FR_{5122} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{5121} \\ DP_{5122} \end{Bmatrix} \tag{4-25}$$

Analog zur Dekomposition von DP_{51} erfolgt die Zerlegung der Kostenaufstellung für den manuellen Referenzprozess (DP_{52}). Aufgrund der Ähnlichkeit des Dekompositionsprozesses von DP_{52} zu DP_{51} wird er an dieser Stelle nicht nochmals im Text aufgeführt, sondern ist im Anhang B.1 nachzulesen. Es ist jedoch zu erwähnen, dass für DP_{52} unter den einmaligen Kosten die Anschaffungskosten für ein Transportfahrzeug, z. B. eine Zugmaschine oder ein FFZ, betrachtet werden. Auch die manuell betriebenen Transportfahrzeuge müssen in Betrieb genommen werden, dabei belaufen sich jedoch die Inbetriebnahmekosten auf eine geringere Summe im Vergleich zum AMR. Dies trifft ebenfalls auf die Kosten der Infrastrukturanpassungen zu.

Ein entscheidender Unterschied sind die laufenden Kosten und hier im Speziellen die fixen Kosten. Denn sie beinhalten die Kosten für fixe Löhne und Gehälter, welche einen Großteil der Gesamtkosten ausmachen. Handelt es sich bei den manuell betriebenen Transportfahrzeugen um Mietfahrzeuge, so müssen diese in der Rubrik laufende Fixkosten und nicht Anschaffungskosten aufgeführt werden.

Schlussendlich werden beide Kostenaufstellungen gegenübergestellt und finanziell bewertet, damit eine fundierte Investitionsentscheidung getroffen werden kann. Daher

folgt nun die Dekomposition der Investitionsrechenverfahren (DP_{53}). DP_{53} lässt sich in die Ermittlung des Durchschnittswerts aller zu erwartenden Kosten einer Investition zu einem bestimmten Zeitpunkt (FR_{531}) sowie in die Ermittlung der Einnahmen und Ausgaben einer Investition über den Zeitraum mehrerer Perioden (FR_{532}) unterteilen. Dabei verfolgen beide FRs unterschiedliche Ziele. FR_{531} fokussiert die kurzfristige, wohingegen FR_{532} die langfristige Betrachtung einer Investition verfolgt. Die Messgröße für beide FRs stellt die Rentabilität (FM_{531} und FM_{532}) dar. Tabelle 4-32 zeigt die dazugehörigen DPs.

Tabelle 4-32: Dekomposition FR_{53} im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit

DP ₅₃ – Investitionsrechenverfahren					
FR_{531}	Durchschnittswert aller zu erwartenden Kosten einer Investition zu einem bestimmten Zeitpunkt ermitteln	DP_{531}	Statische Verfahren	FM_{531}	Rentabilität
FR_{532}	Einnahmen und Ausgaben einer Investition über den Zeitraum mehrerer Perioden ermitteln	DP_{532}	Dynamische Verfahren	FM_{532}	Rentabilität

Gleichung 4-26 zeigt eine ungekoppelte Design Matrix, da keine direkte Beziehung zwischen DP_{531} und FR_{532} besteht.

$$\begin{Bmatrix} FR_{531} \\ FR_{532} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 \\ 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{531} \\ DP_{532} \end{Bmatrix} \quad (4-26)$$

Statische Investitionsrechenverfahren (DP_{531}) können in weitere Teilanforderungen zerlegt werden. Die Gegenüberstellung der Kosten zweier Investitionsprojekte, wie in diesem Fall der Implementierung eines AMR und des manuellen Referenzprozesses, kann durch eine Kostenvergleichsrechnung (DP_{5311}) abgebildet werden. Die Metrik für die Vorteilhaftigkeit der Investition ist die Kostengröße (FM_{5311}). Es wird sich demnach für das Investitionsprojekt entschieden, bei dem die Kosten am kleinsten sind [Tho-2020, S. 384]. Für die Gegenüberstellung des Gewinnbeitrags zweier Investitionsprojekte (FR_{5312}) bietet sich die Gewinnvergleichsrechnung (DP_{5312}) an. Im Vergleich zu DP_{5311} betrachtet sie zudem die Erlösseite einer Investition [Erm-2016, S. 42]. Die Teilanforderung, eine möglichst hohe Verzinsung des eingesetzten Kapitals zu erzielen (FR_{5313}), kann mithilfe einer Rentabilitätsrechnung (DP_{5313}) erfolgen. Auf Basis der Kosten- (DP_{5311}) und Gewinnvergleichsrechnung (DP_{5312}) setzt DP_{5313} den durchschnittlich erzielten Jahresgewinn in Beziehung zum durchschnittlich eingesetzten Kapital [Tho-2020, S. 388]. Um den Zeitraum zu ermitteln ab dem sich eine Investitionsausgabe selbst finanziert hat, die sogenannte Amortisationszeit (FR_{5314}), empfiehlt sich die Amortisationsrechnung (DP_{5314}). Gemessen werden kann die Vorteilhaftigkeit

einer Investition durch die Amortisationszeit (FM_{5314}). Es sollte sich für das Investitionsprojekt entschieden werden, bei dem FM_{5314} niedriger ausfällt. Tabelle 4-33 fasst die Dekomposition zusammen.

Tabelle 4-33: Dekomposition FR_{531} im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit

DP ₅₃₁ – Statische Verfahren					
FR_{5311}	Kosten zweier Investitionsprojekte gegenüberstellen	DP_{5311}	Kostenvergleichsrechnung	FM_{5311}	Kostengröße
FR_{5312}	Gewinnbeitrag zweier Investitionsprojekte gegenüberstellen	DP_{5312}	Gewinnvergleichsrechnung	FM_{5312}	Durchschnittlicher Periodengewinn
FR_{5313}	Möglichst hohe Verzinsung des eingesetzten Kapitals erzielen	DP_{5313}	Rentabilitätsrechnung	FM_{5313}	Verhältnis von Verzinsung zum Vergleichzinssatz
FR_{5314}	Zeitraum, in der sich die Investitionsausgaben selbst finanziert haben, ermitteln	DP_{5314}	Amortisationsrechnung	FM_{5314}	Amortisationsdauer

Innerhalb dieser Dekomposition bestehen keine weiteren Beziehungen, daher weist die Design Matrix ein ungekoppeltes Design auf (Gleichung 4-27).

$$\begin{pmatrix} FR_{5311} \\ FR_{5312} \\ FR_{5313} \\ FR_{5314} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_{5311} \\ DP_{5312} \\ DP_{5313} \\ DP_{5314} \end{pmatrix} \quad (4-27)$$

Auch die dynamischen Verfahren (DP_{532}) lassen sich in detailliertere Teilanforderungen zerlegen. Tabelle 4-34 fasst die Dekomposition der Ermittlung der Einnahmen und Ausgaben einer Investition über den Zeitraum mehrerer Perioden (FR_{532}) zusammen.

Tabelle 4-34: Dekomposition FR_{532} im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit

DP ₅₃₂ – Dynamische Verfahren					
FR_{5321}	Barwert von Aus- und Einzahlungen ermitteln	DP_{5321}	Kapitalwertmethode	FM_{5321}	Kapitalwert
FR_{5322}	Mittlere, jährliche Rendite ermitteln	DP_{5322}	Interne Zinssatzmethode	FM_{5322}	Vergleich interner Zinssatz und Kapitalmarktzinssatz
FR_{5323}	Jährlichen Mehrertrag einer Investition ermitteln	DP_{5323}	Annuitätenmethode	FM_{5323}	Annuität > 0

Der Barwert von Aus- und Einzahlungen (FR_{5321}) kann mithilfe der Kapitalwertmethode (DP_{5321}) ermittelt werden. Stehen zwei oder mehrere Investitionsprojekte zur Auswahl,

so lässt sich mit DP_{5321} feststellen, welches Projekt das rentablere ist. Der Kapitalwert (FM_{5321}) ist die Messgröße für FR_{5321} . Er sagt aus, was der Gegenstandswert einer Investition über den Zeitraum mehrerer Perioden ist. Das Ziel ist ein positiver Kapitalwert, denn nur dann zahlt sich die Investition im Vergleich zur den anderen Investitionsprojekten tatsächlich aus [Tho-2020, S. 50ff.]. Aufbauend auf der Kapitalwertmethode (DP_{5321}) kann die Berechnung der mittleren jährlichen Rendite (FR_{5322}) erfolgen. Die dazugehörige Lösung bietet die interne Zinssatzmethode, auch als interne Zinsfußmethode bekannt (DP_{5322}). Ist der interne Zinssatz größer als der Kapitalmarktzinssatz (FM_{5322}), so ist die Investition absolut vorteilhaft [Göt-2014, S. 103ff.]. Aufgrund der Auswirkung der Kapitalwertmethode (DP_{5321}) auf die interne Zinssatzmethode (DP_{5322}) ist eine Beziehung zwischen DP_{5321} und FR_{5322} festzuhalten. Um den jährlichen Mehrertrag einer Investition zu ermitteln (FR_{5323}) eignet sich die Annuitätenmethode (DP_{5323}). Sie basiert ebenfalls auf der Kapitalwertmethode (DP_{5321}) und weist demnach eine Beziehung zwischen DP_{5321} und FR_{5323} auf. Während hingegen die Kapitalwertmethode (DP_{5321}) den Kapitalwert der Aus- und Einzahlungen über sämtliche Perioden der Investitionsdauer wiedergibt, wandelt die Annuitätsmethode (DP_{5323}) diesen Kapitalwert in gleich große jährliche Einzahlungsüberschüsse um. Ist die Annuität größer Null (FM_{5323}) erweist sich die Investition als vorteilhaft [Tho-2020, S. 393f.]. Gleichung 4-28 zeigt die Beziehungen zwischen DPs und FRs. Aufgrund dieser Beziehungen handelt es sich um eine entkoppelte Design Matrix.

$$\begin{Bmatrix} FR_{5321} \\ FR_{5322} \\ FR_{5323} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} DP_{5321} \\ DP_{5322} \\ DP_{5323} \end{Bmatrix} \quad (4-28)$$

Neben den monetären Investitionsrechenverfahren ist es auch empfehlenswert, nicht-monetären Verfahren, welche auf qualitativen Kriterien beruhen, zu berücksichtigen. An dieser Stelle sei beispielsweise die Nutzwertanalyse, auch als Scoring-Modell bezeichnet, zu erwähnen. Sie vergleicht mehrere Handlungsalternativen gemäß verschiedener Zielkriterien und dazugehöriger Gewichtungen [Sch-2014b, S. 251ff.].

4.7 Erstellung der Gesamt-Design Matrix

Parallel zu den durchgeführten Dekompositionen im vorherigen Abschnitt wurde bei jedem FR-DP-Paar die dazugehörige Design Matrix dargestellt. Sie stellt sicher, dass das Unabhängigkeitsaxiom erfüllt wird, entweder vollständig (ungekoppelte Design Matrix) oder teilweise (entkoppelte Design Matrix). Wie bereits in Abschnitt 2.2.3 erläutert, sind beide Ausprägungen der Design Matrix akzeptabel, da sie ein „*optimales*“ bzw. „*gutes*“ Design darstellen. Zirkelschlüsse, die auf eine gekoppelte Design Matrix und somit auf ein „*schlechtes*“ Design zurückzuführen sind, wurden vermieden. Die

einzelnen dargestellten Designmatrizen im vorherigen Abschnitt lassen sich zu einer Gesamt-Design Matrix zusammenführen. Mithilfe der Software *Acclaro DFSS* von Functional Specs, Inc., die auf den Dekompositionsprozess und die -analyse von Axiomatic Design spezialisiert ist, wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit die Gesamt-Design Matrix erstellt [Fun-2021]. *Acclaro DFSS* wurde zudem zur digital unterstützten Überprüfung des Unabhängigkeitsaxioms eingesetzt.

Abbildung 4-4 zeigt die in *Acclaro DFSS* erstellte Gesamt-Design Matrix der durchgeführten Dekompositionen am Beispiel der ersten und zweiten Hierarchieebene.

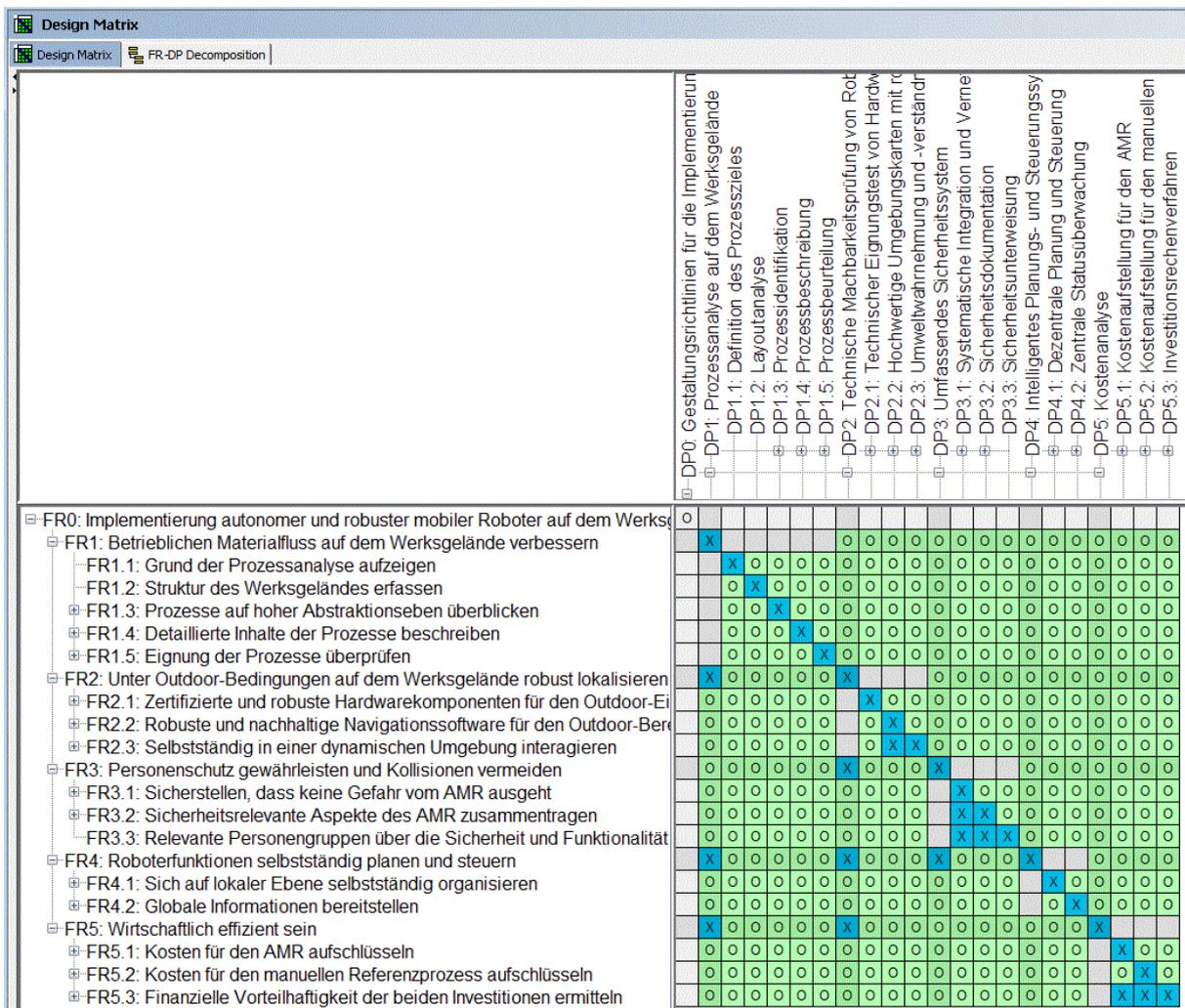


Abbildung 4-4: Ausschnitt aus *Acclaro DFSS* zur Erstellung und Überprüfung der Gesamt-Design Matrix

Die Gesamt-Design Matrix weist ein entkoppeltes Design auf, wie Abbildung 4-4 zeigt. Die blauen Kreuze signalisieren eine Beziehung von FR und DP, wohingegen die grünen Nullen auf keine Verbindung hindeuten. Die blauen Kreuze außerhalb der Diagonale sind zusätzliche Beziehungen, die ein DP zu einem weiteren nachfolgenden FR

besitzt. Von Bedeutung ist an dieser Stelle, dass es sich um nachfolgende FRs handelt. Demnach ist das Unabhängigkeitsaxiom zwar nicht vollständig erfüllt, es wird jedoch toleriert, da bestehende Abhängigkeiten zwischen FRs und DPs überschaubare Rückkopplungsschleifen erzeugen, wenn die DPs in der richtigen Reihenfolge von links nach rechts implementiert werden. Die entkoppelte Gesamt-Design Matrix kann somit als „gutes“ Design eingestuft werden (vgl. Abschnitt 2.2.3). Anhang B.1 bis B.3 beinhaltet die Darstellung der Gesamt-Design Matrix auf allen Hierarchieebenen sowie zusätzliche Berichts- und Darstellungsformen des Systemdesigns.

4.8 Zusammenfassung und Visualisierung des Vorgehensmodells in Form von Gestaltungsrichtlinien

Die in Abschnitt 4.6 ermittelten Gestaltungsfelder eins bis fünf erlauben ein strukturiertes Vorgehen und liefern die nötigen Informationen aus Wissenschaft und Praxis für die Implementierung eines AMR auf dem Werksgelände. Um dieses Vorgehen in ein kompaktes und übersichtliches Format zu übertragen, werden in diesem Abschnitt Gestaltungsrichtlinien in Form einer Grafik aus den zuvor beschriebenen Gestaltungsfeldern zusammengefasst. Diese Gestaltungsrichtlinien spiegeln inhaltlich die einzelnen DPs aus Abschnitt 4.6 wider. Die Richtlinien dienen sowohl aus wissenschaftlicher Sicht als auch aus Anwendersicht als nützliches Werkzeug für das Vorgehen und die Planung zur Implementierung eines AMR. Somit konnte die in Abschnitt 2.3.2 aufgestellte Hauptforschungsfrage, *„Wie lassen sich autonome mobile Roboter auf dem Werksgelände vor dem Hintergrund der Flexibilisierung und Verbesserung der Transporte und unter Berücksichtigung der prozessualen, technischen, sicherheits- und steuerungsspezifischen sowie wirtschaftlichen Aspekte implementieren?“*, beantwortet werden.

Der Einsatz eines AMR eignet sich nicht für jeden Prozess gleichermaßen. Zudem muss nicht jeder Prozess zwingend automatisiert werden. Nur dort wo es zu Verbesserungen (monetär und/oder nicht-monetär) führt, macht eine Implementierung Sinn. Um dies in einem ersten Schritt zu überprüfen, ist eine ausführliche Prozessanalyse unumgänglich. Erst diese gibt Aufschluss und die nötige Transparenz für eine mögliche Automatisierung. Es ist falsch zu behaupten, dass ein AMR überall auf dem Werksgelände eingesetzt werden kann, da es autonom agiert. Auch wenn ein AMR Planungs- und Steuerungsaufgaben selbständig übernimmt, muss trotzdem untersucht werden, wo ein Einsatz tatsächlich eine Effizienzsteigerung herbeiführt. Der AMR soll den Menschen nicht verdrängen, sondern er soll ihn in seinen Tätigkeiten unterstützen und entlasten. Demnach dient das Gestaltungsfeld Prozessverbesserung als Basis für *„die systematische Identifizierung von geeigneten Outdoor-Transportprozessen für den Einsatz eines AMR“*.

Das Gestaltungsfeld technische Machbarkeit betrachtet die technische Gestaltung sowie Anforderungen insbesondere an die Outdoor-Fähigkeit des AMR. Zudem zeigt es die technischen Funktionalitäten, über die ein „autonomer“ mobiler Roboter verfügen sollte. So lassen sich hier bereits klare Differenzen zu herkömmlichen FTS, aber auch zu AMR-Anwendungen im Indoor-Bereich erkennen. Somit beantwortet dieses Gestaltungsfeld vorrangig die Teilforschungsfrage, *„wie AMRs für den Outdoor-Einsatz gestaltet werden sollten“*.

Der Einsatz eines AMR auf einem Werksgelände bedarf die Erfüllung hoher Sicherheitsanforderungen. Diese müssen vor allem vom Roboter selbst erfüllt werden. Ebenfalls muss die Umgebung, in der der Roboter agiert vorbereitet und gegebenenfalls auch angepasst werden. Der Roboter sollte den Mitarbeitern bekannt und vertraut sein, andernfalls fehlt es an Akzeptanz. Das Gestaltungsfeld Sicherheitsmanagement betrifft demnach ebenfalls die Gestaltung des AMR, es gibt jedoch auch Aufschluss über die Fragestellung, *„wie AMRs in bestehende Strukturen und Prozesse integriert werden können“*. Hierbei spielt die Sicherheitskomponente eine entscheidende Rolle.

„Welchen Einfluss haben AMRs im Outdoor-Bereich auf zukünftige Transporte?“ Diese Teilforschungsfrage kann voranging mit dem Gestaltungsfeld Auftragsmanagement beantwortet werden, denn in diesem Gestaltungsfeld steht die Autonomie des Roboters im Fokus. Erst die dezentrale Steuerung ermöglicht ein autonomes Handeln. Jedoch wird an dieser Stelle deutlich gezeigt, dass es sich nicht ausschließlich um eine dezentrale Steuerung handeln muss, sondern dass diese z. B. mit einer IoT-Plattform in Form eines globalen Koordinators, kombiniert werden kann. *„Willkürliches“* Verhalten der AMRs, welches durch eine vollständige Autonomie verursacht werden könnte und zu Chaos und Unordnung führt, ist keinesfalls gewünscht. Daher muss der AMR sich an *„Spielregeln“* innerhalb seines Aktionsraums halten. Erst dann ist ein geordneter Materialfluss aufrechtzuhalten und ein gemeinsames Handeln mit weiteren Akteuren, ob manuell, automatisiert oder *„autonomisiert“* möglich. Durch das Übernehmen von Planungs- und Steuerungsaufgaben, neben den Durchführungsaufgaben, die bereits von herkömmlichen FTS übernommen werden, verschiebt sich die gesamte Prozessverantwortung vom Menschen zum AMR. Dies ist ein elementarer Schritt, da der Mensch dem AMR die gesamte Handlungs- und Entscheidungsmacht übergibt, allerdings unter der Prämisse festgelegter Regeln und Vorschriften, welche sowohl für den Menschen als auch für den AMR, zu befolgen sind.

Das letzte Gestaltungsfeld, die Wirtschaftlichkeit, bezieht sich auf alle Teilforschungsfragen, denn ohne einen wirtschaftlichen Mehrwert ist die Implementierung eines AMR auf dem Werksgelände nicht umsetzbar. Da das Kernziel eines jeden Unternehmens

die Maximierung des Gewinns ist, ist eine Effizienzsteigerung, beispielsweise in Form von Kosteneinsparungen oder Prozesszeitoptimierungen, erforderlich.

Somit dient das fünfte Gestaltungsfeld der monetären Validierung des AMR. Mithilfe der beschriebenen Investitionsrechenverfahren kann der Einsatz eines AMR im Vergleich zu einem manuellen Referenzprozess bewertet und auf Basis dessen eine fundierte Entscheidung getroffen werden. Zweifellos beinhaltet diese Entscheidung nicht nur monetäre Faktoren, sondern bezieht sich auch auf nicht-monetäre Aspekte, wie etwa dem Vertrauen in die Technik oder der Akzeptanz der Mitarbeiter. Schließlich muss jedes Unternehmen, jeder Anwender, selbst entscheiden, ob eine Implementierung durchgeführt werden soll oder nicht. Allerdings liefern die in dieser Forschungsarbeit entwickelten Gestaltungsrichtlinien, welche sich aus den Wünschen der Kunden/Stakeholder, den funktionalen Anforderungen und Metriken sowie den dazugehörigen Lösungsparametern ergeben, ein fundiertes Vorgehen für die Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände und tragen somit zur Entscheidungsfindung bei.

Zusammenfassend zeigt Abbildung 4-5 die Gestaltungsrichtlinien in Form einer Grafik.

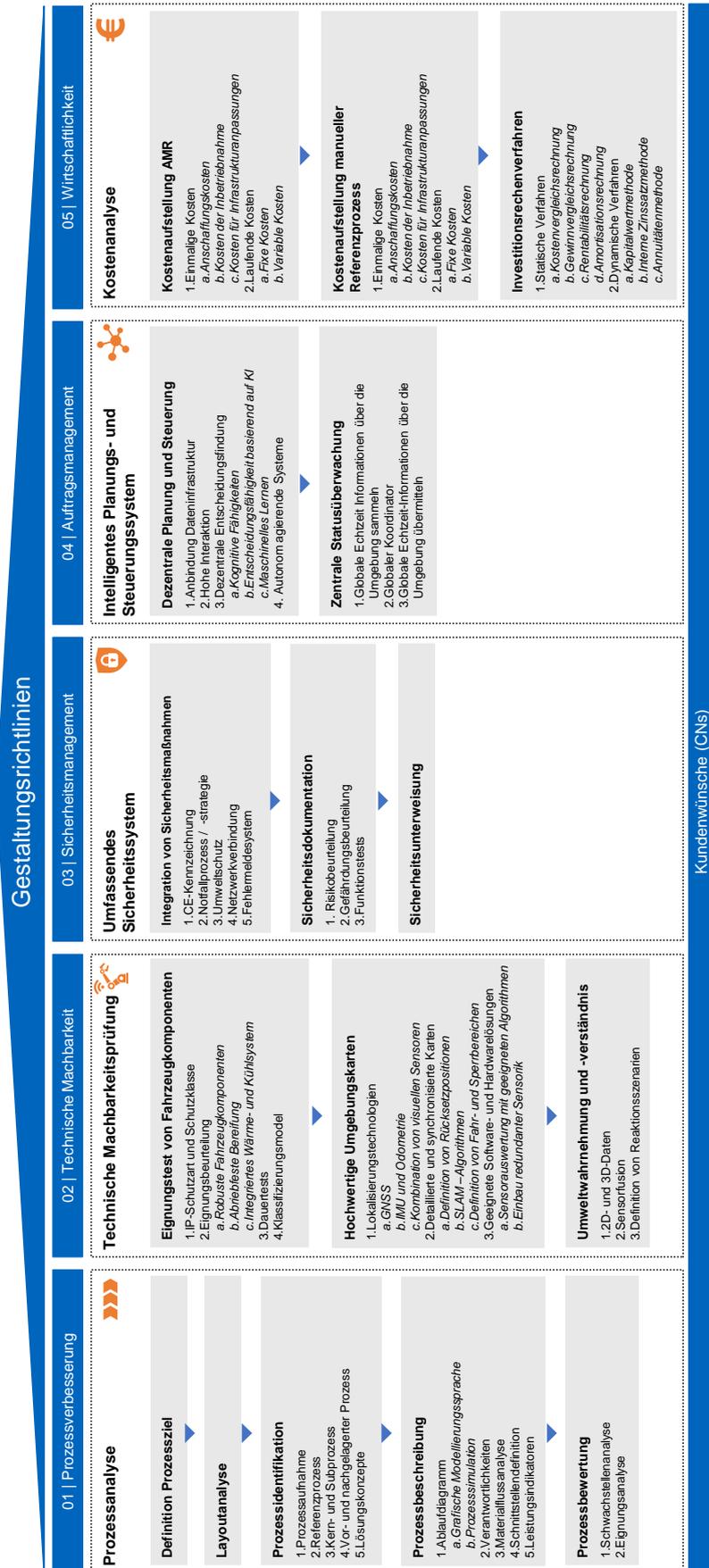


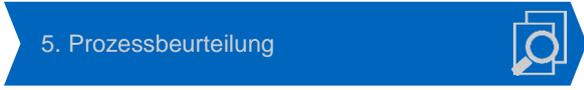
Abbildung 4-5: Gestaltungsrichtlinien für die Implementierung von AMRs auf dem Werksgelände

4.9 Überführung der Gestaltungsrichtlinien in Checklisten für die praktische Anwendung

In diesem Abschnitt werden die Gestaltungsrichtlinien für die praktische Anwendung in Checklisten überführt. Diese Checklisten spiegeln die einzelnen Gestaltungsfelder der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Richtlinien wider. Beispielhaft wird das Vorgehen zum Ausfüllen der Listen an der Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände, welche Tabelle 4-35 zeigt, erläutert. Die Vorlagen der vier weiteren Checklisten sind dem Anhang C.1 zu entnehmen.

Tabelle 4-35: Vorlage Checkliste – Prozessanalyse auf dem Werksgelände

			Checkliste: Prozessanalyse auf dem Werksgelände	
Projekt:		Planungsschritt: 		
1. Definition Prozessziel 		Verantwortlichkeit:		
Definition Prozessziel		<input type="checkbox"/>		
2. Layoutanalyse 		Verantwortlichkeit:		
Layoutanalyse		<input type="checkbox"/>		
3. Prozessidentifikation 		Verantwortlichkeit:		
3.1	Prozessaufnahme	<input type="checkbox"/>		
3.2	Referenzprozess	<input type="checkbox"/>		
3.3	Definition Kern- und Subprozess	<input type="checkbox"/>		
3.4	Definition vor- und nachgelagerter Prozess	<input type="checkbox"/>		
3.5	Lösungskonzepte	<input type="checkbox"/>		
4. Prozessbeschreibung 		Verantwortlichkeit:		
4.1	Ablaufdiagramm			
	4.1.1 Grafische Modellierungssprache	<input type="checkbox"/>		
	4.1.2 Prozesssimulation	<input type="checkbox"/>		
4.2	Definition Verantwortlichkeiten	<input type="checkbox"/>		

4.3	Materialflussanalyse	<input type="checkbox"/>	
4.4	Schnittstellendefinition	<input type="checkbox"/>	
4.5	Definition von Leistungsindikatoren	<input type="checkbox"/>	
 5. Prozessbeurteilung		Verantwortlichkeit:	
5.1	Schwachstellenanalyse	<input type="checkbox"/>	
5.2	Eignungsanalyse	<input type="checkbox"/>	

Die in Tabelle 4-35 abgebildeten blauen Pfeile stellen die übergeordneten Schritte zur Prozessanalyse dar. Diese übergeordneten Schritte ergeben sich aus der ersten Säule des in Abbildung 4-5 dargestellten Hauses. Beinhalten diese übergeordneten Schritte Teilschritte, so werden sie durch Nummerierungen dargestellt. Wie aus den Gestaltungsrichtlinien zu entnehmen ist, besteht die Prozessanalyse aus fünf übergeordneten Schritten: der Definition des Prozessziels, der Layoutanalyse, der Prozessidentifikation, der Prozessbeschreibung und der Prozessbeurteilung. Den einzelnen übergeordneten Schritten sind anschließend Verantwortlichkeiten zu zuordnen. Die Checklisten sollten, wenn möglich, von den Experten der einzelnen Bereiche ausgefüllt werden. So kann dies beispielsweise im Bereich der Prozessanalyse der Anwender und im Bereich der technischen Gestaltung des AMR der Hersteller sein.

Beinhalten die übergeordneten Schritte weitere Teilschritte, so sind diese ebenfalls aufzuführen. Durch die Kontrollkästchen können die einzelnen Schritte und deren Teilschritte systematisch abgearbeitet werden. Die leeren Spalten nach den Kontrollkästchen dienen als Kommentarfeld. Es wird empfohlen, diese sowohl beim Abhaken des Kontrollkästchens als auch beim Auslassen auszufüllen, bzw. zu begründen. Warum wurde ein übergeordneter Schritt/Teilschritt nicht durchgeführt oder wie wurde ein Teilschritt explizit durchgeführt? Zudem zeigen die Kommentarfelder auf, welche Schritte eingehalten bzw. missachtet wurden und warum. Das Missachten einzelner Schritte kann im weiteren Projektverlauf zu Komplikationen, Mehrfacharbeit oder Missverständnissen führen.

Jede Säule der Gestaltungsrichtlinien (vgl. Abbildung 4-5) und somit jedes Gestaltungsfeld wird in einer separaten Checkliste abgebildet. Die erstellten Checklisten dienen im nachfolgenden Kapitel, der demonstratorischen Umsetzung, als Hilfsmittel für das systematische Vorgehen bei der Implementierung eines AMR auf dem Werksge-lände.

5 Demonstratorische Umsetzung der Gestaltungsrichtlinien am Beispiel eines Automobilherstellers

5.1 Vorgehensweise und Betrachtungsgegenstand

Ausgehend von einem konkreten Anwendungsfall im BMW-Werk Dingolfing, welcher ein gutes Experimentierfeld darstellt, da er die in dieser Forschungsarbeit relevanten Rahmenbedingungen (vgl. Abschnitt 2.3.1) erfüllt, hat sich die Autorin für die Durchführung der demonstratorischen Umsetzung bei BMW entschieden. Die entwickelten Gestaltungsrichtlinien in Form von Checklisten für die Implementierung eines AMR auf dem Werksgelände werden an diesem Praxisbeispiel validiert.

Als Validierungsbeispiel dient die Implementierung eines AMR im Werk Dingolfing. Ziel der Validierung durch eine demonstratorische Umsetzung ist es demnach, die Eignung und Nutzung der Gestaltungsrichtlinien mithilfe der Prozessverantwortlichen im BMW-Werk Dingolfing sowie dem Hersteller des AMR, der französischen Firma EasyMile, zu bewerten. Aufgrund der fortschrittlichen technischen Entwicklung des AMR von EasyMile im Vergleich zu anderen Outdoor-AMRs, wurde dieses für die Implementierung von BMW ausgewählt. Der Fokus der Validierung liegt auf der praktischen Umsetzung der Gestaltungsrichtlinien.

Die demonstratorische Umsetzung am Beispiel des BMW-Werks Dingolfing stellt keine „klassische“ Serienimplementierung eines AMR auf dem Werksgelände dar. Für BMW handelt es sich um eine zeitlich begrenzte Test-/Pilotphase, die bei erfolgreicher Durchführung in die Serie überführt werden soll. Der Grund hierfür ist die für BMW neuartige Technologie. Hierzu zählen der Indoor- und Outdoor-Einsatz, Fahrgeschwindigkeiten von bis zu 15 km/h sowie das von EasyMile entwickelte Sicherheitssystem für deren AMRs. Auf die Anwendung der Gestaltungsrichtlinien hat die vorgeschaltete Testphase jedoch keinen direkten Einfluss, da die erarbeiteten Richtlinien sowohl für eine Serienimplementierung, als auch für einen Piloten eine hilfreiche und strukturierte Planungsunterstützung liefern. Zwar vertreibt EasyMile sein AMR bereits als Produkt am Markt, jedoch ist es das erste Fahrzeug seiner Art, welches bei BMW im Outdoor-Bereich zum Einsatz kommt.

AMRs, wie beispielsweise den eigens entwickelten *Smart Transport Robot* hat BMW bereits mehrfach im Indoor-Bereich implementiert. Allerdings fehlt es an Erfahrungen im Outdoor-Bereich. Anhand der Pilotierung soll diese Erfahrungslücke geschlossen

und Erkenntnisse über den Outdoor-Einsatz gesammelt werden. Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten Gestaltungsrichtlinien liefern einen wichtigen Beitrag zur strukturierten Planung und Durchführung der Implementierung von AMRs auf dem Werksgelände.

Das Vorgehen der Umsetzung orientiert sich an den fünf Säulen der Gestaltungsrichtlinien (vgl. Abbildung 4-5). Zunächst wird in Abschnitt 5.2.1 mit den Prozessverantwortlichen von BMW die Prozessanalyse im Werk Dingolfing durchgeführt. Dadurch sollen Verbesserungspotenziale für den betrieblichen Materialfluss auf dem Werksgelände identifiziert werden.

Es folgt die technische Machbarkeitsprüfung. Hierfür werden gemeinsam mit EasyMile die einzelnen Schritte abgearbeitet. Mithilfe der technischen Prüfung soll sichergestellt werden, dass eine robuste Lokalisierung und Navigation unter Outdoor-Bedingungen auf dem Werksgelände erfüllt ist.

Anschließend erfolgt die Prüfung des umfassenden Sicherheitssystems. An dieser Umsetzung sind sowohl Hersteller als auch Anwender beteiligt. Die Sicherheit des AMR muss zwar primär vom Hersteller gewährleistet werden, trotzdem ist die Durchführung einzelner Sicherheitsmaßnahmen auch beim Anwender empfehlenswert und teilweise sogar notwendig.

Das autonome Planen und Steuern der Roboterfunktionen soll mithilfe eines intelligenten Planungs- und Steuerungssystems umgesetzt werden. Hierfür wird gemeinsam mit EasyMile der AMR in die zum Beginn dieser Arbeit vorgestellte Klassifizierungsmatrix eingeordnet. Dadurch soll gezeigt werden, welche Autonomiestufe die einzelnen Aufgabenebenen des AMR aufweisen. Gegebenenfalls müssen hierfür auch Anpassungen in der Infrastruktur von BMW vorgenommen werden.

Abschließend wird sowohl mit BMW als auch mit EasyMile eine Kostenanalyse für den AMR und den manuellen Referenzprozess durchgeführt. Da von BMW für eine Pilotierung eines Innovationsprojekts mit Fokus auf die Technologie keine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt wird, ist die Annahme getroffen worden, den AMR nach der Pilotierung in die Serie zu überführen. Somit kann eine fundierte Aussage zum letzten Schritt, der Investitionsentscheidung, welche sich aus der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit der Implementierung des AMR ergibt, getroffen werden.

Der Betrachtungsgegenstand im Rahmen der demonstratorischen Umsetzung im BMW-Werk Dingolfing ist der autonome Elektroschlepper der Firma EasyMile mit dem Namen *TractEasy*. Abbildung 5-1 zeigt den *TractEasy*.



Abbildung 5-1: TractEasy von EasyMile [Eas-2020b]

Neben Einsatzszenarien in der Automobillogistik findet der *TractEasy* Anwendung in der Luftfahrtbranche, im Speziellen im Bereich Gepäck- und Cargo-Handling. Den elektrischen Schlepper für die Automatisierung bezieht EasyMile von der TLD Group¹⁵. Der *TractEasy* basiert auf dem elektrischen Kleinschlepper *JET-16* der TLD Group. Auf Basis dieses Fahrzeugs wird die gesamte Automatisierung, sowohl software- als auch hardwareseitig von EasyMile durchgeführt [INS-2019] [TLD-2022].

5.2 Anwendung der Gestaltungsrichtlinien für die Pilotierung des TractEasy im BMW-Werk Dingolfing

Die Anwendung der Gestaltungsrichtlinien in Form von Checklisten folgt dem in Abschnitt 4.9 beschriebenen Vorgehen und wird in Zusammenarbeit mit BMW und EasyMile durchgeführt. Die Durchführung der Checklisten findet vor der physischen Implementierung des *TractEasy* im BMW-Werk Dingolfing statt.

Um Rückschlüsse auf sensible Daten der betrachteten Unternehmen zu verhindern, werden Teile der in diesem Abschnitt vorkommenden Zahlen anonymisiert bzw. normiert. Dies trägt zur Allgemeingültigkeit bei und beeinträchtigt die wissenschaftliche

¹⁵ Die Die TLD Group ist ein französisches Unternehmen, das sich auf die Entwicklung und Herstellung von Start- und Landebahnausrüstungen für Flughäfen spezialisiert hat und eine Tochtergesellschaft der ALVEST Group ist [TLD-2022].

Validierung nicht. Hiervon ist insbesondere der Abschnitt 5.2.5 zur Kostenanalyse betroffen.

5.2.1 Prozessanalyse auf dem Werksgelände

Für die Pilotierung des *TractEasy* im BMW-Werk Dingolfing wird zunächst die Prozessanalyse gemeinsam mit den Betreibern des *TractEasy* im BMW-Werk Dingolfing durchgeführt. Im ersten Schritt erfolgt die Definition des Prozessziels. Das übergeordnete Ziel von BMW ist die Überprüfung der Tauglichkeit und Verfügbarkeit des *TractEasy* im In- und Outdoor-Bereich unter Berücksichtigung wechselnder und exogener Einflussfaktoren, z. B. Witterung und Verkehr. Hierzu zählen vor allem Witterungseinflüsse, Temperaturvarianz und die Konnektivität des GPS. Aus diesem Grund handelt es sich zunächst um eine Pilotierung und um keine Serienimplementierung. Erweist sich der *TractEasy* als robustes Outdoor-AMR, so plant BMW ihn in die Serie zu überführen. Um die Robustheit des *TractEasy* zu ermitteln, werden während der Pilotierung unterschiedliche „*Stresstests*“ durchgeführt, die die Grenzen der Technik des Fahrzeugs unter extremen Bedingungen aufzeigen sollen. Die nachstehende Tabelle 5-1 zeigt die mit BMW ausgefüllte Checkliste.

Tabelle 5-1: Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Definition Prozessziel

Checkliste: Prozessanalyse auf dem Werksgelände	
Projekt: Pilotierung TractEasy im BMW-Werk Dingolfing	Planungsschritt: 
1. Definition Prozessziel 	Verantwortlichkeit: BMW
Definition Prozessziel	<input checked="" type="checkbox"/> Überprüfung der Anwendungstauglichkeit und Verfügbarkeit im In- und Outdoor-Bereich durch wechselnde, exogene Einflussfaktoren. Ziel: Nach der Pilotierung in die Serie überführen. Prämisse: Robustheit des TractEasy muss sichergestellt sein. Prüfung durch Dauer- und Stresstests.

Nachfolgend wird eine Layoutanalyse durchgeführt (vgl. Tabelle 5-2). Im Fokus stehen hierbei gebäudeübergreifende Anwendungsfälle im BMW-Werk Dingolfing, Liegenschaft 2.4. Um die Outdoor-Tauglichkeit des *TractEasy* zu erproben und zugleich die Materialflüsse im Werk aufrechtzuerhalten und nicht zu behindern, werden Anwendungsfälle mit normalem bis hohem Verkehrsaufkommen betrachtet. Das Beherrschen erhöhten Verkehrsaufkommens kann zu einem späteren Zeitpunkt den Serieneinsatz begünstigen und rechtfertigen.

Tabelle 5-2: Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Layoutanalyse

2. Layoutanalyse		Verantwortlichkeit: BMW
Layoutanalyse	☑	Abgeleitete Tauglichkeit gebäudeübergreifender Anwendungsfälle am Standort Dingolfing (Werk 2.4). Bewusst Anwendungsfall mit einem höheren Verkehrsaufkommen ausgewählt, um auf Serienbetrieb vorzubereiten.

Nach der Layoutanalyse hat sich gezeigt, dass nur ein Prozess für die Pilotierung des *TractEasy* infrage kommt, da bei allen anderen Prozessen eine Gleisüberfahrt erforderlich ist. Der *TractEasy* ist aktuell nicht darauf ausgelegt, über Gleise zu fahren. Daher wurden nicht alle möglichen Outdoor-Transportprozesse im Werk Dingolfing aufgenommen, sondern ausschließlich der ausgewählte zu automatisierende Prozess näher betrachtet. Da der automatisierte Prozess identisch zum manuellen Prozess ist, stellt er zugleich den manuellen Referenzprozess dar. Dabei handelt es sich um einen klassischen Versorgungsprozess mit einem Elektroschlepper, wie er bereits in Abschnitt 3.3.1 im Rahmen der Referenzprozessbausteine vorgestellt wurde.

Abbildung 5-2 zeigt das Layout des BMW-Werks Dingolfing, Liegenschaft 2.4, die einzelnen Bereiche sowie den Anwendungsfall und die beiden Fahrrouten des zu automatisierenden Prozesses.

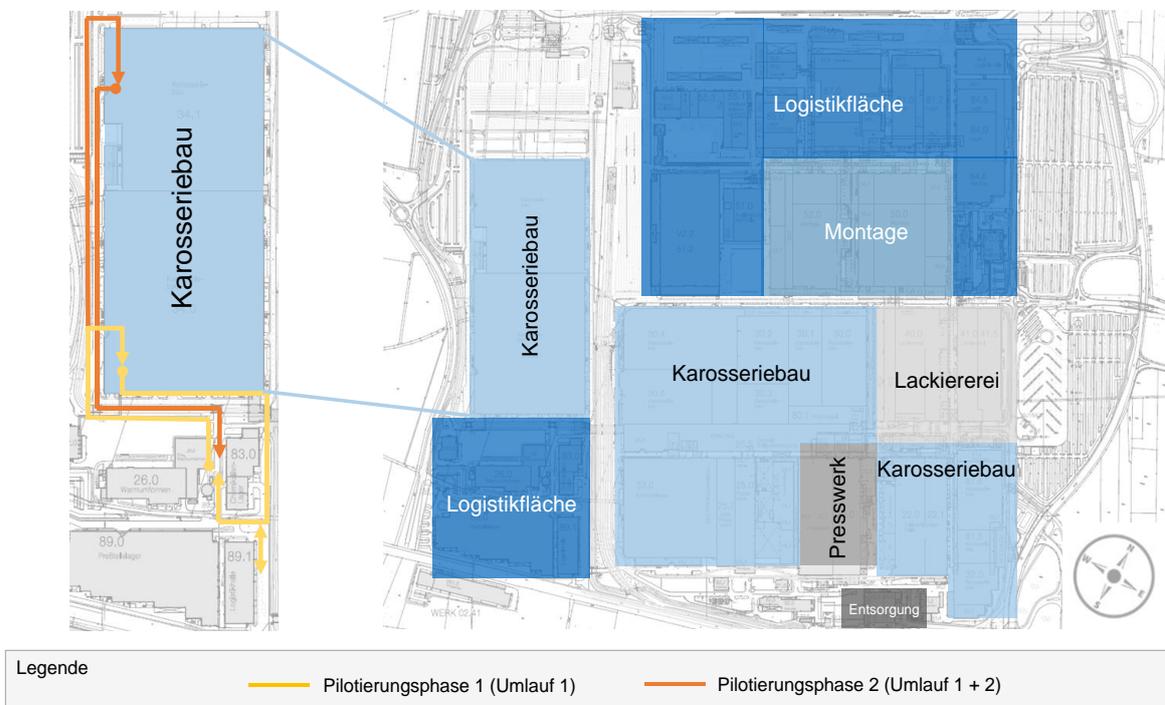


Abbildung 5-2: Layout des BMW-Werks Dingolfing mit dem Anwendungsfall und den Fahrrouten des zu automatisierenden Versorgungsprozesses

Der Versorgungsprozess findet entlang des Karosseriebaus statt. Es handelt sich um einen Vollgut-/Leergutwechsel, der in zwei Umläufe unterteilt ist. In den ersten drei Monaten der Pilotphase soll ausschließlich der erste Umlauf vom *TractEasy* übernommen werden. Läuft dieser Umlauf stabil, so kommt die zweite Route ab frühestens dem dritten Monat hinzu. Die Fahrrouten befinden sich primär außerhalb der Hallen, zum Teil jedoch auch innerhalb.

Die Definition von Kern- und Subprozessen sowie von vor- und nachgelagerten Prozessen ist nicht zusätzlich erfolgt, sondern vom manuellen Versorgungsprozess übernommen worden. Lösungskonzepte für mögliche Engpasssituationen sind betrachtet worden, unter anderem die Berücksichtigung einer Baustelle, die Untersuchung der Schleppkurve bei der Einfahrt in die Hallen sowie die Installation einer Parkbucht für LKW, um Staugefahr auf der Nord-Süd-Achse zu vermeiden. Tabelle 5-3 fasst die Prozessidentifikation zusammen.

Tabelle 5-3: Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Prozessidentifikation

3. Prozessidentifikation		Verantwortlichkeit: BMW	
3.1	Prozessaufnahme	<input checked="" type="checkbox"/>	Wird nicht neu erstellt, sondern vom manuellen Versorgungsprozess übernommen.
3.2	Referenzprozesse	<input checked="" type="checkbox"/>	Gebäudeübergreifende zyklische Materialversorgung (manueller Transportprozess).
3.3	Definition von Kern- und Subprozessen	<input checked="" type="checkbox"/>	Wird vom manuellen Transportprozess übernommen.
3.4	Definition von vor- und nachgelagerten Prozessen	<input checked="" type="checkbox"/>	Wird vom manuellen Transportprozess übernommen.
3.5	Lösungskonzepte	<input checked="" type="checkbox"/>	Wird erstellt (z. B. Beachtung der Baustelle, Schleppkurve bei Einfahrt in Hallen und Parkbucht für LKW auf Nord-Süd-Achse).

Für die Pilotierung des *TractEasy* im BMW-Werk Dingolfing wird kein Ablaufdiagramm erstellt, dieses wird nach Aussage von BMW erst bei einer Serienimplementierung vorgenommen, da der Fokus während der Pilotierung auf der technischen Machbarkeit liegt. Die Verantwortlichkeiten werden mithilfe eines Organigramms dargestellt und definiert. Im Zuge dessen werden auch Schnittstellen zwischen Lieferanten und BMW festgelegt. Eine Materialflussanalyse wird ebenfalls erst bei einer Serienimplementierung durchgeführt. In der Pilotphase wird ausschließlich das zu transportierende Bauteil betrachtet. Hierbei handelt es sich um pressgehärtete Stahlbauteile (*engl. Press Hardened Steel, PHS*) für die Karosserie des Automobils. Abbildung 5-3 zeigt die PHS-Bauteile.



Abbildung 5-3: Automobilkarosserie mit rot gekennzeichneten PHS-Bauteilen [Wan-2017, S. 6]

Die PHS-Bauteile befinden sich in SLT und werden in drei hintereinander gekoppelten Planentrailern transportiert. Diese stellen eine maximale Zuglast von jeweils 4,8 t dar. Die Länge des Trailerzugs beläuft sich insgesamt auf 16,5 m, die Breite auf 2,65 m. Abbildung 5-4 zeigt die drei Planentrailer sowie den Elektroschlepper P250 der Firma Linde Material Handling GmbH, welcher derzeit für den Versorgungsprozess eingesetzt wird.



Abbildung 5-4: Elektroschlepper P250 mit Planentrailern [Lin-2021] [Gey-2021]

Der ausschlaggebende Leistungsindikator für die Pilotierung des *TractEasy* im BMW-Werk Dingolfing ist die Gesamtanlageneffektivität (OEE). Mithilfe dieser Kennzahl können sowohl die Produktivität von Anlagen als auch deren Verluste abgebildet werden. Der OEE setzt sich aus dem Verfügbarkeits-, Leistungs- und Qualitätsfaktor zusammen [Foc-2018, S. 3]. Je höher der OEE-Wert, desto stabiler und verlässlicher läuft eine Anlage. BMW fordert einen OEE von mindestens 85 %. Neben der Definition dieser zentralen Kennzahl wird zusätzlich ein Lastenheft angefertigt, welches die Kennzahlen, Testfälle und Anforderungen an die Pilotierung des *TractEasy* auflistet und zusammenfasst. Tabelle 5-4 zeigt die Checkliste der Prozessbeschreibung.

Tabelle 5-4: Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Prozessbeschreibung

4. Prozessbeschreibung 		Verantwortlichkeit: BMW	
4.1	Ablaufdiagramm		
4.1.1	Grafische Modellierungssprache	<input type="checkbox"/>	Wird erst für die Serienanwendung erstellt, da im Rahmen der Pilotierung der Fokus von BMW auf der technischen Machbarkeit des TractEasy liegt.
4.1.2	Prozesssimulation	<input type="checkbox"/>	Wird erst für die Serienanwendung erstellt, da im Rahmen der Pilotierung der Fokus von BMW auf der technischen Machbarkeit des TractEasy liegt.
4.2	Definition der Verantwortlichkeiten	<input checked="" type="checkbox"/>	Organigramm mit Dienstleister/Lieferant.
4.3	Materialflussanalyse	<input type="checkbox"/>	Wird erst für die Serienanwendung erstellt, da im Rahmen der Pilotierung der Fokus von BMW auf der technischen Machbarkeit des TractEasy liegt.
4.4	Schnittstellendefinition	<input checked="" type="checkbox"/>	Ableitbar aus dem Organigramm.
4.5	Definition von Leistungsindikatoren	<input checked="" type="checkbox"/>	Zentrale KPI: OEE sollte bei 85 % liegen, zusätzlich Lastenheft mit entsprechenden Kennzahlen und Testfällen.

Die im dritten Schritt erarbeiteten Lösungskonzepte werden als Basis für die Schwachstellenanalyse verwendet. Darüber hinaus wird keine zusätzliche ausführliche Schwachstellenanalyse von BMW durchgeführt, sondern auf das Geländegutachten von EasyMile zurückgegriffen, welches die wesentlichen Prozessschwachstellen aufgedeckt hat. Hierzu zählt unter anderem die Schleppkurve bei der Einfahrt in die Hallen. Die vollständige Eignungsanalyse wird durch BMW erst beim Serieneinsatz erstellt. Zusammenfassend zeigt Tabelle 5-5 die Checkliste für die Prozessbeurteilung.

Tabelle 5-5: Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Prozessbeurteilung

5. Prozessbeurteilung 		Verantwortlichkeit: BMW	
5.1	Schwachstellenanalyse	<input checked="" type="checkbox"/>	Wird auf Basis der Lösungskonzepte aus dem dritten Planungsschritt und dem Geländegutachten von EasyMile durchgeführt (z. B. Schleppkurve bei Einfahrt in die Hallen).
5.2	Eignungsanalyse	<input type="checkbox"/>	Wird erst für die Serienanwendung erstellt, da im Rahmen der Pilotierung der Fokus von BMW auf der technischen Machbarkeit des TractEasy liegt.

5.2.2 Technische Machbarkeitsprüfung

Die technische Machbarkeitsprüfung wird gemeinsam mit EasyMile durchgeführt. Da der *TractEasy* auf dem *JET-16* basiert, welcher einen klassischen Elektroschlepper für die Gepäckabfertigung an Flughäfen sowie industrielle Anwendungen darstellt, sind die Fahrzeugkomponenten wie das Fahrgestell und Fahrwerk sowie die Elektrik und Mechanik bereits auf den Außenbereich ausgelegt. Im Zuge der Automatisierung

musste EasyMile jedoch einzelne Fahrzeugkomponenten nachrüsten bzw. anpassen. Hierzu zählt beispielsweise die Elektrik für die Ansteuerung des Fahrzeugs sowie die zusätzliche Ausstattung mit unterschiedlicher Sensorik. Die sicherheitszertifizierten Sensoren, welche sich am unteren Rahmen des *TractEasy* befinden, sind mit Schutzhauben versehen, um Regen, Schnee und Schmutz bestmöglich von den Sensoren fernzuhalten. Diese Sensoren sowie weitere von EasyMile hinzugefügte und modifizierte Komponenten weisen ein IP-Level zwischen IP44 und IP65 auf und stellen somit robuste Komponenten für den Outdoor-Bereich dar.

Der *TractEasy* verfügt zudem über luftgefüllte Gummireifen mit Profil, somit ist eine abriebfeste Bereifung sichergestellt. Das Fahrzeug, welches für die Pilotierung in Dingolfing eingesetzt wird, besitzt Bleisäure- und keine Lithium-Ionen-Akkumulatoren. Die Bleisäure-Akkumulatoren sind zwar ventiliert, allerdings nicht beheizt oder gekühlt. Auch für weitere Komponenten, wie das Bedienerpanel am Fahrzeug ist kein Wärme- und Kühlsystem integriert.

Eine Eignungsbeurteilung der unterschiedlichen Materialien und Komponenten wird zum einen für das Grundfahrzeug, den *JET-16* von TLD und zum anderen für die zusätzlichen und modifizierten Fahrzeugkomponenten, wie der Sensorik von EasyMile durchgeführt. Als konventioneller Elektroschlepper wird der *JET-16* großflächig auf Flughäfen eingesetzt. Seit 2018 ist der *TractEasy* auch bei der Peugeot Société Anonyme (PSA)-Gruppe in Sochaux, Frankreich sowie seit 2020 am Narita International Flughafen in Tokio, Japan im Dauereinsatz [PSA-2018] [Eas-2021].

Die Zusammensetzung der unterschiedlichen Fahrzeugkomponenten wird in einem ständigen Verbesserungsprozess optimiert. Dieser kontinuierliche Verbesserungsprozess der Sensorkombinationen findet sowohl hardware- als auch softwareseitig statt. Tabelle 5-6 zeigt die von EasyMile ausgefüllte Checkliste.

Tabelle 5-6: *Checkliste technische Machbarkeitsprüfung – Technischer Eignungstest von Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz*

Checkliste: Technische Machbarkeitsprüfung			
Projekt: Pilotierung TractEasy im BMW-Werk Dingolfing		Planungsschritt: 	
		Verantwortlichkeit: EasyMile/TLD	
1.1	Schutzart und Schutzklasse von Fahrzeugkomponenten		
1.1.1	Robuste Fahrzeugkomponenten	<input checked="" type="checkbox"/>	Abhängig von den unterschiedlichen Komponenten liegt das IP-Level zwischen IP44 und IP65.
1.1.2	Abriebfeste Bereifung	<input checked="" type="checkbox"/>	Da der TractEasy auf dem TLD <i>JET-16</i> basiert, ist die Eignung der Materialien im Außenbereich bereits erprobt. Der TractEasy besitzt luftgefüllte Gummireifen mit Profil.
1.1.3	Integriertes Wärme- und Kühlsystem	<input type="checkbox"/>	Bleisäure-Batterie ist ventiliert. Bedienerpanel am TractEasy ist nicht beheizt bzw. gekühlt.
1.2	Eignungsbeurteilung verschiedener Materialien für den Outdoor-Einsatz	<input checked="" type="checkbox"/>	Da der TractEasy auf dem TLD <i>JET-16</i> basiert, ist die Eignung der Materialien für den Outdoor-Einsatz bereits erprobt. Zusätzlich sind für die Sensoren Schutzhauben angebracht. Diese leiten das Wasser ab, sodass ein direkter Wasserkontakt zu den Sensoren vermieden wird.
1.3	Durchführung von Dauertests	<input checked="" type="checkbox"/>	Die TLD <i>JET-16</i> Plattform ist großflächig auf Flughäfen im Dauereinsatz.
1.4	Klassifizierungsmodell von Fahrzeugkomponenten anhand von Leistungskriterien	<input checked="" type="checkbox"/>	Erprobte Plattform durch TLD. Sensorkombination für bestmögliche Performance. Kontinuierlicher Verbesserungsprozess (hardware-/softwareseitig).

Für die Lokalisierung des *TractEasy* verwendet EasyMile neben GPS auch RTK dGPS für eine genauere Standortbestimmung. Außerdem sind IMU und Odometrie feste Bestandteile der Lokalisierungstechnologie des *TractEasy*. Eine Kombination von LiDAR und Reflektoren oder Kameras und QR-Codes ist hingegen nicht Teil der Lokalisierungstechnologie.

Bei der Inbetriebnahme des Fahrzeugs wird der zu befahrende Bereich kartographiert. Die daraus resultierende 3D-Karte wird mit den Daten aus dem LiDAR abgeglichen. Innerhalb der aufgenommenen 3D-Karte können auf Wunsch des Kunden beliebig viele Start- und Zielpositionen, wie z. B. Be- und Entladepunkte, definiert werden.

Für die Erstellung von detaillierten und aktualisierten 3D-Karten werden SLAM-Algorithmen verwendet. Die Fahrrouten werden durch festgelegte Trajektorien auf der 3D-Karte bestimmt. Diese Trajektorien verlässt das Fahrzeug nicht. Im Zuge dessen können auch Sperrbereiche auf der 3D-Karte festgelegt werden. Die Sensorauswertung erfolgt mithilfe selbstentwickelter Algorithmen. Der *TractEasy* verfügt über mehrere LiDAR Sensoren, Radar sowie eine 3D-Kamera, welche eine mögliche technische Um-

setzung für eine Tiefenwahrnehmung, auch als Stereovision bezeichnet, darstellt. Somit wird das Kriterium einer redundanten Sensorik erfüllt. Tabelle 5-7 fasst diese Punkte zusammen.

Tabelle 5-7: *Checkliste technische Machbarkeitsprüfung – Hochwertige Umgebungskarten mit robuster und akkurater Lokalisierung*

2. Hochwertige Umgebungskarten mit robuster und akkurater Lokalisierung 		Verantwortlichkeit: EasyMile	
2.1	Lokalisierungstechnologien		
2.1.1	GNSS	<input checked="" type="checkbox"/>	Neben GPS wird RTK dGPS zur genaueren Lokalisierung verwendet.
2.1.2	IMU und Odometrie	<input checked="" type="checkbox"/>	Teil der Lokalisierungstechnologie.
2.1.3	Kombination von visuellen Sensoren mit Umgebungsobjekten	<input type="checkbox"/>	Nicht notwendig, da LiDAR-Daten mit der vorkartographierten 3D-Karte abgeglichen werden. Dies bietet einen Baustein für die Lokalisierung (Sensorfusion mit geeigneten Algorithmen).
2.2	Detaillierte und synchronisierte Karte		
2.2.1	Definition von Rücksetzpositionen (Start- und Zielposition)	<input checked="" type="checkbox"/>	Be- und Entladepunkte. Beliebige Anzahl möglich. Je nach Kundenwunsch.
2.2.2	SLAM-Algorithmen	<input checked="" type="checkbox"/>	Werden verwendet. Elementare Grundbausteine für die autonome Navigation.
2.2.3	Definition von Fahr- und Sperrbereichen auf der Karte	<input checked="" type="checkbox"/>	Die relevanten Trajektorien werden kartographiert und der TractEasy verlässt diese nicht.
2.3	Geeignete Software- und Hardwarelösungen		
2.3.1	Sensorauswertung mit geeigneten Algorithmen	<input checked="" type="checkbox"/>	Auf Basis selbstentwickelter Algorithmen.
2.3.2	Einbau redundanter Sensorik	<input checked="" type="checkbox"/>	Mehrere LiDAR Sensoren, Radar und Stereovision.

Im Bereich der Umweltwahrnehmung und des Umgebungsverständnisses verwendet EasyMile für den *TractEasy* sowohl Daten aus 2D- und 3D-LiDAR Sensoren als auch aus 2D- und 3D-Kameras. Die Fusion dieser Daten erfolgt mit eigens entwickelten Algorithmen. Um auf unterschiedliche Situationen in der Umgebung angemessen reagieren zu können, wird der *TractEasy* innerhalb verschiedener Szenarien getestet, hierzu zählt auch der öffentliche Verkehrsraum. Da EasyMile ein weiteres autonomes Fahrzeug im öffentlichen Raum im Einsatz hat, werden hier Synergien und Erkenntnisse auf den *TractEasy* übertragen, beispielweise in Bezug auf die Wahrnehmung. Je nach Situation reagiert der *TractEasy* auf seine Umgebung. Wird beispielsweise ein Hindernis erkannt, so erfolgt die Anpassung der Fahrgeschwindigkeit, der *TractEasy* fährt langsamer oder stoppt, wenn es notwendig ist. Bei Einfahrten in Kreuzungen wird der Einfahrbereich auf Hindernisse gescannt und überprüft. Tabelle 5-8 zeigt die Checkliste des dritten und letzten Schritts im Bereich der technischen Machbarkeitsprüfung.

Tabelle 5-8: Checkliste technische Machbarkeitsprüfung – Umweltwahrnehmung und -verständnis durch Sensorik

3. Umweltwahrnehmung und -verständnis durch Sensorik 		Verantwortlichkeit: EasyMile	
3.1	Daten von Kameras und Laserscannern (2D/3D)	<input checked="" type="checkbox"/>	Daten aus 2D- und 3D-LiDAR Sensoren und Kameras werden aufgenommen.
3.2	Sensorfusion	<input checked="" type="checkbox"/>	Auf Basis selbstentwickelter Algorithmen.
3.3	Definition von Reaktionsszenarien basierend auf der Umgebung	<input checked="" type="checkbox"/>	Je nach Situation reagiert der TractEasy auf die Umgebung. Wird ein Hindernis erkannt, erfolgt eine Anpassung der Geschwindigkeit bis hin zum Stopp. Entfernt sich das Hindernis, so wird die Ausgangsgeschwindigkeit wiederhergestellt. Vor Einfahrt in Kreuzungen wird der Einfahrtbereich auf Hindernisse gescannt. Vielfältige Szenarien (auch auf öffentlicher Straße) werden übertragen, um zu lernen und gegenseitige Synergieeffekte zu erzielen.

Es ist festzuhalten, dass der *TractEasy* in nahezu jedem Schritt die Gestaltungsrichtlinien erfüllt. Schritt 1.1.3 (Integriertes Wärme- und Kühlsystem) ist für die Bleisäure-Akkumulatoren nach Aussage von EasyMile nicht erforderlich. Das Bedienpanel am Fahrzeug könnte jedoch überhitzen oder unterkühlen, daher empfiehlt EasyMile den *TractEasy* über Nacht oder während Stillstandszeiten innerhalb eines Gebäudes zu parken. Die Kombination von visuellen Sensoren mit Umgebungsobjekten ersetzt der *TractEasy* durch eine plausible Alternative, dem Abgleich von LiDAR-Daten mit der vorkartographierten 3D-Karte.

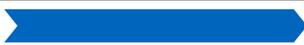
5.2.3 Umfassendes Sicherheitssystem

Die Checkliste für das umfassende Sicherheitssystem wird primär mit EasyMile und nur für die Schritte 1.3 und 2.2 mit BMW durchgeführt, da sich mehrere Schritte direkt auf das Fahrzeug und nur einige auf die Umgebung beziehen.

Der *TractEasy* besitzt eine CE-Kennzeichnung. Diese betrifft sowohl die Hardware als auch die Software des Fahrzeugs. Des Weiteren verfügt der *TractEasy* über fünf Not-ausschalter und zwei Abschleppösen, damit das Fahrzeug auch in Notfallsituationen manuell gestoppt und gegebenenfalls abgeschleppt werden kann. Zudem kann jederzeit vom automatischen in den manuellen Modus gewechselt werden. Sowohl auf Seite von EasyMile als auch von BMW bestehen keine zusätzlichen Umweltauflagen im Vergleich zu einem manuellen Elektroschlepper, die vorab hätten geprüft werden müssen. Auf Seiten des BMW-Einkaufs liegen allgemeine Rahmenbedingungen vor, diese unterscheiden sich jedoch nicht von denen eines manuellen Schleppers.

Eine stabile Netzwerkverbindung ist aus Sicht von EasyMile für die Pilotierung des *TractEasy* im BMW-Werk Dingolfing nicht zwingend erforderlich, um einen reibungslosen Betrieb sicherzustellen. Der *TractEasy* verfügt über einen eigenen Industriecomputer mit SIM-Karte, der die Daten aus den Sensoren für die Lokalisierung und Navigation direkt auf dem Fahrzeug verarbeitet und auswertet. Eine Anbindung an ein WLAN ist daher nicht erforderlich. Fehler werden am Bedienerpanel des *TractEasy* angezeigt und an die Leitsteuerung (*EZFleet*) übermittelt. Auf Basis dessen erzeugt *EZFleet* Fehler- und Überwachungsberichte. Diese sind von EasyMile remote abrufbar. Auf Wunsch des Kunden können diese Informationen außerdem an weitere Endgeräte, wie z. B. Tablets oder Mobiltelefone, weitergeleitet werden. Tabelle 5-9 zeigt die Checkliste für die systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen.

Tabelle 5-9: Checkliste umfassendes Sicherheitssystem – Systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen

		Checkliste: Umfassendes Sicherheitssystem	
Projekt: Pilotierung TractEasy im BMW-Werk Dingolfing		Planungsschritt: 	
		Verantwortlichkeit: EasyMile/BMW	
1.1	CE-Kennzeichnung	<input checked="" type="checkbox"/>	Der TractEasy besitzt eine CE-Kennzeichnung, sowohl hardwareseitig als auch softwareseitig (CE-Kennzeichnung für das Sicherheitssystem).
1.2	Notfallprozess/-strategie	<input checked="" type="checkbox"/>	Der TractEasy besitzt fünf Notausknöpfe. Ein Wechsel in den manuellen Modus ist jederzeit möglich. Abschleppösen sind am TractEasy vorhanden.
1.3	Prüfung der Anforderungen an den Umweltschutz	<input type="checkbox"/>	Keine zusätzliche Prüfung des Umweltschutzes erforderlich für die Pilotierung. Allgemeine Rahmenvorgaben vom BMW-Einkauf (identisch zu manuell betriebenen Schleppern).
1.4	Stabile Netzwerkverbindung	<input type="checkbox"/>	Eine stabile Netzwerkverbindung ist nicht zwingend notwendig, um einen nahtlosen Betrieb zu gewährleisten, da der TractEasy nicht allein auf diese Informationen angewiesen ist, sondern die Daten aus verschiedenen Sensoren für die Lokalisierung und Navigation auf dem Fahrzeug auswertet.
1.5	Fehlermeldesystem	<input checked="" type="checkbox"/>	Fehler werden am Bedienpanel am TractEasy angezeigt und an die Leitsteuerung (<i>EZFleet</i>) übermittelt. Erstellung von Fehlerberichten/Monitoring (z. B. Anzahl der Notstopps).

Zur Risikobeurteilung ist EasyMile verpflichtet. Ohne dieses Dokument ist die Arbeitssicherheit bei BMW nicht in der Lage, das Fahrzeug abzunehmen. Die Risikobeurteilung basiert auf einem Geländegutachten, welches EasyMile vor Ort in Dingolfing aufgenommen hat. Im Rahmen des erstellten Gutachtens findet ein Abgleich mit dem operativen Gestaltungsbereich des *TractEasy* und den Betriebsbedingungen auf dem

Werksgelände von BMW statt. Auf Basis dessen erfolgt dann die Risikobeurteilung. Die Gefährdungsbeurteilung wird nach dem Erhalt der Risikobeurteilung vom Betreiber des Anwendungsfalls in Dingolfing und der Abteilung für Arbeitssicherheit von BMW durchgeführt.

EasyMile führt Funktionstests von Sicherheitseinrichtungen im Rahmen von Simulationen, auf dem Prüfstand, auf dem Testgelände in Toulouse, Frankreich sowie bei externen Dienstleistern durch. Die Testergebnisse sind von EasyMile dokumentiert und können auf Wunsch des Kunden zur Verfügung gestellt werden. Im Fall der Pilotierung des *TractEasy* im BMW-Werk Dingolfing wird eine zusätzliche Dokumentation von ausgewählten Testszenarien, wie unter anderem Starkregen, Steigung/Gefälle und hohes Verkehrsaufkommen von EasyMile durchgeführt. Tabelle 5-10 fasst die Checkliste der Sicherheitsdokumentation zusammen.

Tabelle 5-10: Checkliste umfassendes Sicherheitssystem – Sicherheitsdokumentation

2. Sicherheitsdokumentation 		Verantwortlichkeit: EasyMile/BMW	
2.1	Risikobeurteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	Bei einer Voranalyse (Geländegutachten) des Anwendungsfalls wird bereits eine interne Risikobewertung durchgeführt. Es findet ein Abgleich der Umgebung mit der Operational Design Domain des <i>TractEasy</i> und den Betriebsbedingungen auf dem Gelände statt. Auf Basis dessen erfolgt die Risikobeurteilung.
2.2	Gefährdungsbeurteilung	<input checked="" type="checkbox"/>	Erfolgt auf Basis der Risikobeurteilung und wird von BMW in Dingolfing und der Arbeitssicherheit erstellt.
2.3	Funktionstests von Sicherheitseinrichtungen	<input checked="" type="checkbox"/>	Es finden ausführliche Tests auf dem Testgelände in Toulouse, in der Simulation (Test Bench) und bei externen Dienstleistern statt.

Die Sicherheitsunterweisung erfolgt durch EasyMile im Rahmen der Inbetriebnahme. Für die Arbeitssicherheit, Instandhaltung, Feuerwehr und die direkten Betreiber des *TractEasy* in Dingolfing findet eine ausführliche Sicherheitsunterweisung mit zugehöriger Erläuterung der Risikobeurteilung und Betriebsanleitung statt. Anschließend übergibt EasyMile die gesamte Schulungsdokumentation an BMW. EasyMile bietet zudem eine zusätzliche Informationskampagne für die restlichen Interessengruppen an (Tabelle 5-11).

Tabelle 5-11: Checkliste umfassendes Sicherheitssystem – Sicherheitsunterweisung

3. Sicherheitsunterweisung 		Verantwortlichkeit: EasyMile/BMW	
3.1	Sicherheitsunterweisung	<input checked="" type="checkbox"/>	Im Rahmen der Inbetriebnahme erfolgt eine Mitarbeiterschulung, bei der ausführlich auf sicherheitsrelevante Themen eingegangen wird. Im Anschluss wird die Schulungsdokumentation übergeben. Informationskampagne für die restlichen Stakeholder.

Da bis auf zwei Teilschritte (Prüfung der Anforderungen an den Umweltschutz und die Einrichtung einer stabilen Netzwerkverbindung) die restlichen Schritte erfüllt sind, kann von einem umfassenden Sicherheitssystem ausgegangen werden. Zumal keine zusätzlichen Vorgaben an den Umweltschutz anfallen und die stabile Netzwerkverbindung für diesen Anwendungsfall nicht zwingend erforderlich ist. Mit der abgeschlossenen Prozessanalyse und der technischen Machbarkeitsprüfung sowie der Gewährleistung eines umfassenden Sicherheitssystems kann nachfolgend mit der Checkliste Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem fortgefahren werden.

5.2.4 Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem

Das intelligente Planungs- und Steuerungssystem liefert vor allem Aufschluss über die Intelligenz des Fahrzeugs. Eine dezentrale Planung und Steuerung liegt beim *TractEasy* nur bedingt vor. Im Rahmen der Pilotierung ist keine Anbindung an ein internes BMW-System vorgesehen, unter anderem aus Gründen der Netzwerksicherheit. Bei einer dauerhaften Implementierung müssten mögliche IT-Schnittstellen definiert, analysiert und entsprechende Maßnahmen abgeleitet werden.

Es findet eine Interaktion zwischen dem *TractEasy* und seiner Umgebung statt, allerdings nicht auf einem hohen Level (vgl. Abschnitt 2.1.4 Tabelle 2.1). Der *TractEasy* ist zwar in der Lage, über beispielsweise akustische Signale auf sich aufmerksam zu machen. Er kann sich jedoch nicht mit anderen manuell bedienten Fahrzeugen oder Personen austauschen bzw. mit ihnen interagieren. Über eine dezentrale Entscheidungsfindung verfügt der *TractEasy* nicht. Im Bereich der kognitiven Fähigkeiten und der Entscheidungsfähigkeit basierend auf KI finden innerhalb von EasyMile bereits Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten statt. Allerdings sind nach Aussage von EasyMile diese Bereiche technisch sehr komplex und derzeit noch wenig zuverlässig. Analog verhält es sich mit dem maschinellen Lernen. Forschung und Entwicklung finden statt, aber auch hier ist die technische Komplexität sehr hoch und die Zuverlässigkeit gering. Dies liegt mitunter an der noch fehlenden Datengrundlage, welche für das maschinelle Lernen zwingend erforderlich ist. Die Potenziale des maschinellen Lernens, insbesondere das Voraussagen von Handelsketten oder -abläufen ist für EasyMile ein

erstrebenswertes Ziel, damit zukünftig Planungs- und Steuerungsvorgänge mehr und mehr vom Roboter und weniger vom Menschen übernommen werden können. Zum aktuellen Stand ist der *TractEasy* als Gesamtsystem nicht als autonom einzuordnen, da er auf einzelnen Aufgabenebenen auf den Input des Menschen angewiesen ist, beispielsweise bei der automatischen Anpassung der Fahrroute bei plötzlichem Auftreten eines Hindernisses. Tabelle 5-12 fasst den Schritt dezentrale Planung und Steuerung zusammen.

Tabelle 5-12: *Checkliste intelligentes Planungs- und Steuerungssystem – Dezentrale Planung und Steuerung*

Checkliste: Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem			
Projekt: Pilotierung TractEasy im BMW-Werk Dingolfing		Planungsschritt: 	
1. Dezentrale Planung und Steuerung 		Verantwortlichkeit: EasyMile	
1.1	Anbindung an Dateninfrastruktur	<input type="checkbox"/>	Im Rahmen des Pilotprojekts wird der TractEasy nicht an die Dateninfrastruktur angebunden (Gründe der Netzwerksicherheit).
1.2	Hohe Interaktion zwischen unabhängigen Systemelementen	<input checked="" type="checkbox"/>	Interaktion findet statt, allerdings nicht auf einem hohen Level. Z. B. macht der TractEasy durch akustische Signale (Hupe bei Fußgängerüberweg) auf sich aufmerksam.
1.3	Dezentralisierte Entscheidungsfindung		
1.3.1	Kognitive Fähigkeiten	<input type="checkbox"/>	Forschung und Entwicklung finden statt, allerdings technisch sehr komplex und wenig zuverlässig.
1.3.2	Entscheidungsfähigkeit basierend auf KI	<input type="checkbox"/>	Forschung und Entwicklung finden statt, allerdings technisch sehr komplex und wenig zuverlässig.
1.3.3	Maschinelles Lernen	<input type="checkbox"/>	Forschung und Entwicklung finden statt, allerdings technisch sehr komplex und wenig zuverlässig. Datengrundlage muss zunächst erstellt werden. Voraussagen von Handlungen/Handlungsketten.
1.4	Autonom agierendes System	<input type="checkbox"/>	Es erfolgt keine automatische Anpassung von Strecken, z. B. im Fall von Hindernissen.

Der *TractEasy* besitzt keine zentrale Statusüberwachung. Es werden keine globalen Echtzeit-Informationen über die Umgebung gesammelt. Der *TractEasy* verfügt ausschließlich über die Informationen, die er aus der Sensorik und Aktorik erhält. Aktuell liegen keine Bestrebungen von EasyMile vor, diese Funktionalität zu entwickeln. Sehr wohl finden jedoch Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich eines globalen Koordinators statt. Dieser ist allerdings erst dann interessant, wenn es sich um mehrere Fahrzeuge oder eine Flotte handelt. Für die Pilotierung im BMW-Werk Dingolfing wird zunächst nur ein Fahrzeug implementiert, daher spielt der globale Koordinator für diesen Anwendungsfall eine untergeordnete Rolle. Da keine globalen Echtzeit-Informationen gesammelt werden, werden auch keine solche Daten übermittelt. Der *TractEasy* verfügt schlichtweg über keine zentrale Statusüberwachung, sondern

ausschließlich über eine zentrale Leitsteuerung (*EZFleet*). Tabelle 5-13 zeigt die Checkliste für die zentrale Statusüberwachung.

Tabelle 5-13: Checkliste intelligentes Planungs- und Steuerungssystem – Zentrale Statusüberwachung

2. Zentrale Statusüberwachung 		Verantwortlichkeit: EasyMile	
2.1	Globale Echtzeit-Informationen über die Umgebung sammeln	<input type="checkbox"/>	Aktuell keine Bestrebungen von EasyMile.
2.2	Globaler Koordinator	<input type="checkbox"/>	Forschung und Entwicklung finden zur Optimierung von großen Flotten statt.
2.3	Globale Echtzeit-Informationen über die Umgebung übermitteln	<input type="checkbox"/>	Aktuell keine Bestrebungen von EasyMile.

Nach der Definition intralogistischer Systeme (vgl. Abschnitt 2.1.4) weist der *TractEasy* auf der Ausführungsebene eine hohe Autonomiestufe (Stufe 4) auf, wohingegen die Betriebs- und Unternehmensleitebene von geringen Autonomiestufen (Stufe 0-1) geprägt sind. Abbildung 5-14 veranschaulicht die Einordnung des *TractEasy* in die Klassifizierungsmatrix.

Tabelle 5-14: Einordnung des *TractEasy* in die Klassifizierungsmatrix (durchgeführt von Easy-Mile)

Aufgabenebene	Autonomiestufen					
	Stufe 0	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	Stufe 4	Stufe 5
Unternehmensleitebene (Level 5)	Manuelle Entscheidungsfindung bei der Planung des Gesamtsystems	Entscheidungsunterstützungssystem in der Gesamtsystemplanung	Teilweise zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Planung des Gesamtsystems	Zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Planung des Gesamtsystems	Teilweise dezentralisierte Entscheidungsfindung in der Gesamtsystemplanung	Dezentralisierte Entscheidungsfindung in der Gesamtsystemplanung
Betriebsleitebene (Level 4)	Manuelle Entscheidungsfindung in der Gesamtsystemsteuerung	Entscheidungsunterstützungssystem in der Gesamtsystemsteuerung	Teilweise zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Gesamtsystemsteuerung	Zentralisierte Entscheidungsfindung in der Gesamtsystemsteuerung	Teilweise dezentralisierte Entscheidungsfindung bei der Gesamtsystemsteuerung	Dezentralisierte Entscheidungsfindung bei der Gesamtsystemsteuerung
Prozessleitebene (Level 3)	Manuelle Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Entscheidungsunterstützungssystem bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Teilweise zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Zentralisierte Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Teilweise dezentralisierte Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung	Dezentralisierte Entscheidungsfindung bei der Prozesssteuerung und -überwachung
Steuerungsebene (Level 2)	Manuelle Suche und Übermittlung von Informationen auf Anfrage	Unterstützte Suche und Übermittlung von Informationen auf Anfrage	Unterstützte und teilweise in sich geschlossene Informationsbeschaffung und -verarbeitung	Völlig eigenständige Informationserschaffung, Informationserzeugung und Interaktion mit dem Zentralsystem	Völlig in sich geschlossene Informationserschaffung, Informationserzeugung und teilweise Interaktion mit anderen Systemelementen	Vollständig in sich geschlossene Informationserschaffung, Informationserzeugung und Interaktion mit anderen Systemelementen
Prozess-/Feldebene (Level 0/1)	Manuelle Ausführung in statischer Umgebung	Manuell unterstützte Ausführung in statischer Umgebung	Assistierte und teilweise in sich geschlossene Ausführung in statischer Umgebung	Teilweise in sich geschlossene Ausführung in einer sich nur selten ändernden Umgebung	Vollständig in sich geschlossene Ausführung in dynamischer Umgebung	Vollständig in sich geschlossene Ausführung in komplexer und dynamischer Umgebung

5.2.5 Kostenanalyse

Aufgrund der zeitlich begrenzten Pilotanwendung, bei der die technische Machbarkeit des *TractEasy* im Fokus steht, ist auf Seiten von BMW keine Kostenanalyse vorgesehen. Damit die Checkliste der Kostenanalyse trotzdem validiert werden kann, ist die Annahme getroffen worden, den *TractEasy* bereits in die Serie zu implementieren. Ausgehend von dieser Situation wird die Kostenaufstellung des *TractEasy* gemeinsam mit EasyMile durchgeführt, wohingegen die Kostenaufstellung des manuellen Referenzprozesses und die Investitionsrechenverfahren in Zusammenarbeit mit BMW erfolgen.

Die Anschaffungskosten, die im Rahmen des *TractEasy* anfallen, belaufen sich nach Annahme der Autorin auf rund 200.000 €. Als Teil der einmaligen Kosten setzen sich die Anschaffungskosten zu ca. 90 % aus der modifizierten Plattform *JET-16* inkl. Sensorik, Aktorik und Batterien sowie zu 10 % aus der Software (Betriebssystem, On-Board-Unit für die Ampel- und Torsteuerung) und den zugehörigen Lizenzen zusammen.

Zu den Inbetriebnahmekosten gehören das Geländegutachten sowie dessen Dokumentation, die Kartierung des Anwendungsfalls und das Anlernen des *TractEasy*, welches sich aus Strecke anlegen und ausbessern, der Festlegung der Start- und Zielpositionen sowie der Fahr- und Sperrbereiche zusammensetzt. Je nach Komplexität des Standorts und Dauer belaufen sich diese Kosten durchschnittlich auf ca. 50.000 €.

Außerdem fallen Kosten für das Projektmanagement und Reisen an, welche je nach Standort variieren. An dieser Stelle wird angenommen, dass sich diese Kosten auf rund 10.000 € belaufen. Kosten für Infrastrukturanpassungen fallen nicht an, da keine Anpassungen vorgenommen werden müssen. Das Batteriewechseln (Bleisäure-Akkumulatoren) erfolgt analog zum manuellen Elektroschlepper. Daher muss keine zusätzliche Landeinfrastruktur integriert werden.

Unter der Annahme einer Serienimplementierung im Zweischichtbetrieb fünf Tage die Woche belaufen sich die Fixkosten im Bereich der laufenden Kosten auf ca. 35.000 € jährlich. Bestandteile der Fixkosten sind Versicherungen (Mobilfunk, RTK dGPS) und Wartungsverträge für beispielsweise den IT-Support sowie die generelle Grundinstandhaltung (Software, Updates, sicherheitsrelevante Hardware). Zu den variablen Kosten zählen außerordentliche Instandhaltungen, Wartungen und Reparaturen sowie Ersatzteile. Diese Kosten sind schwer kalkulierbar, da derzeit für die Abnutzung im industriellen Umfeld kaum Erfahrungswerte vorliegen. Daher wird auch hier eine Annahme von ca. 15.000 € jährlich getroffen. Eine Zusammenfassung der Kostenaufstellung für den *TractEasy* liefert Tabelle 5-15.

Tabelle 5-15: Checkliste Kostenanalyse – Kostenaufstellung für den TractEasy

Checkliste: Kostenanalyse			
Projekt: Pilotierung TractEasy im BMW-Werk Dingolfing (Annahme Serienimplementierung)		Planungsschritt: 	
1. Kostenaufstellung für den TractEasy 		Verantwortlichkeit: EasyMile	
1.1	Computergestütztes Tool für die einmaligen Kosten des TractEasy		
1.1.1	Eingabefunktion für die Anschaffungskosten	<input checked="" type="checkbox"/>	Die Anschaffungskosten setzen sich sowohl aus Hardware- (modifizierte Plattform <i>JET-16</i> inkl. Sensorik, Aktorik und Batterien), Software- (Betriebssystem, On-Board-Unit für Ampel- und Torsteuerung) als auch den Lizenzkosten zusammen. Angenommen werden hier 200.000 €.
1.1.2	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Inbetriebnahme	<input checked="" type="checkbox"/>	Die Kosten für die Inbetriebnahme beinhalten unter anderem die ausführliche Analyse des Geländes und dessen Dokumentation, die Kartierung des Anwendungsfalls, das Anlernen des TractEasy (Strecken anlegen und ausbessern, Stationen festlegen, Verkehrssituationen festlegen). Je nach Komplexität des Standorts und Dauer belaufen sich diese Kosten durchschnittlich auf 50.000 €. Des Weiteren fallen Kosten für das Projektmanagement und Reisekosten an, die je nach Standort variieren und hier mit 10.000 € angesetzt werden.
1.1.3	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Infrastrukturanpassung	<input type="checkbox"/>	Für den Betrieb des TractEasy werden keine Infrastrukturanpassungen benötigt.
1.2	Computergestütztes Tool für die laufenden Kosten des TractEasy		
1.2.1	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die fixen Kosten	<input checked="" type="checkbox"/>	Hierzu zählen Versicherungen (Mobilfunk, RTK dGPS), fixe Wartungsverträge für den IT-Support und die generelle Grundinstandhaltung (Software, Updates, sicherheitsrelevante Hardware). Unter der Annahme einer Serienimplementierung im Zweischichtbetrieb fünf Tage die Woche belaufen sich diese Kosten auf rund 35.000 € jährlich.
1.2.2	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die variablen Kosten	<input checked="" type="checkbox"/>	Hierzu zählen unter anderem die geschätzten Kosten für außerordentliche Instandhaltungen, Wartungen und Reparaturen sowie Ersatzteile. Schwer kalkulierbar, da aktuell keine flächendeckende Nutzung im industriellen Umfeld und demnach auch keine Erfahrungen vorliegen. An dieser Stelle wird eine Annahme von 15.000 € jährlich getroffen.

BMW verwendet für die Wirtschaftlichkeitsberechnung das *WIRE Tool*, welches auf *Microsoft Excel* basiert. In diesem Tool werden sowohl die einmaligen als auch die laufenden Kosten erfasst. Zu den Anschaffungskosten im Rahmen der einmaligen Kosten zählt der Elektroschlepper, welcher mit rund 25.000 € angenommen wird. Inbetriebnahmekosten und Kosten für die Infrastrukturanpassung fallen für den manuellen Referenzprozess nicht an.

Für den manuellen Referenzprozess wird der Elektroschlepper P250 im Zweischichtbetrieb von zwei Mitarbeitern bedient. Die Kostensätze der Mitarbeiter sind werksabhängig, durchschnittlich können sie jedoch mit 80.000 € pro Jahr angesetzt werden.

Hierbei ist eine Kostensteigerung von 2,5 % jährlich zu berücksichtigen. Weiterhin gehören zu den fixen Kosten die Wartungskosten, welche mit 10.000 € beziffert werden. Energiekosten werden bei Neuplanungen von beispielsweise Werken oder Gebäuden miteinbezogen, nicht aber für einzelne FFZ. Tabelle 5-16 zeigt die Checkliste der Kostenaufstellung des manuellen Referenzprozesses.

Tabelle 5-16: Checkliste Kostenanalyse – Kostenaufstellung für den manuellen Referenzprozess

2. Kostenaufstellung für den manuellen Referenzprozess 		Verantwortlichkeit: BMW	
2.1	Computergestütztes Tool für die einmaligen Kosten des manuellen Referenzprozesses		
2.1.1	Eingabefunktion für Anschaffungskosten	<input checked="" type="checkbox"/>	Verwendung des WIRE Tools (Excel basiert). Anschaffungskosten für den Elektroschlepper P250 werden mit rund 25.000 € angenommen.
2.1.2	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Inbetriebnahme	<input checked="" type="checkbox"/>	Fällt für den manuellen Prozess nicht an.
2.1.3	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Infrastrukturanpassung	<input checked="" type="checkbox"/>	Fällt für den manuellen Prozess nicht an.
2.2	Computergestütztes Tool für die laufenden Kosten des manuellen Referenzprozesses		
2.2.1	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die fixen Kosten	<input type="checkbox"/>	Verwendung des WIRE Tools. Die Personalkosten (zwei Mitarbeiter für zwei Schichten) können durchschnittlich mit ca. 80.000 € pro Jahr inkl. 2,5 % ¹⁶ Steigerung pro Jahr angenommen werden. Wartungskosten werden mit 10.000 € angenommen. In den Fixkosten inbegriffen ist die Miete für den Elektroschlepper, wenn sie sich auf < 1.000 € im Monat beläuft.
2.2.2	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die variablen Kosten	<input checked="" type="checkbox"/>	Energiekosten werden nicht für einzelne FFZ, sondern für gesamte Gebäude oder Werke berechnet und fallen daher nicht an.

Analog zum zweiten Schritt werden auch die Investitionsrechenverfahren bei BMW im *WIRE Tool* abgebildet und berechnet, wobei hier keinerlei statische Verfahren betrachtet werden. Das *WIRE Tool* verwendet ausschließlich die Kapitalwertmethode. Der resultierende Kapitalwert muss nach Aussage von BMW größer als 35 % sein, andernfalls wird die Investition bzw. Maßnahme nicht weiter betrachtet.

Die Kapitalwertmethode wird von BMW als Investitionsrechenverfahren bevorzugt, da sie unterschiedliche Einnahmen und Ausgaben sowie Erlöse und Kosten mathematisch und grafisch abbilden kann. Hierbei ist insbesondere die deutlich höhere Anschaffungsinvestition im Jahr t_0 zu beachten, die sich dann allerdings ab einer bestimmten Gewinnschwelle (Break-Even-Point) amortisiert. Die interne Zinssatzmethode und die

¹⁶ Angenommener Prozentsatz.

Annuitätenmethode werden nicht zusätzlich betrachtet. Die Checkliste zu den Investitionsrechenverfahren ist der Tabelle 5-17 zu entnehmen.

Tabelle 5-17: Checkliste Kostenanalyse – Investitionsrechenverfahren

3. Investitionsrechenverfahren 		Verantwortlichkeit: BMW	
3.1	Statische Verfahren		
3.1.1	Kostenvergleichsrechnung	<input type="checkbox"/>	Wird von BMW nicht verwendet.
3.1.2	Gewinnvergleichsrechnung	<input type="checkbox"/>	Wird von BMW nicht verwendet.
3.1.3	Rentabilitätsrechnung	<input type="checkbox"/>	Wird von BMW nicht verwendet.
3.1.4	Amortisationsrechnung	<input type="checkbox"/>	Wird von BMW nicht verwendet.
3.2	Dynamische Verfahren		
3.2.1	Kapitalwertmethode	<input checked="" type="checkbox"/>	Verwendung des WIRE Tools. Kapitalwert muss über 35 % liegen, erst dann wird die Investition/ Maßnahme weiterverfolgt. Basierend auf den Annahmen der Serienimplementierung und der Kosten liegt der Kapitalwert der Kostenersparnis bei über 35 % und wird somit weiterverfolgt. Strategische Projekte z. B. ein neues Fahrzeugmodell oder ein neuer Werksstandort dürfen auch zwischen 12 % und 35 % liegen. Die Kapitalwertmethode wird favorisiert, da mehrere Einnahmen und Ausgaben sowie Erlöse und Kosten in die Berechnung einfließen.
3.2.2	Interne Zinssatzmethode	<input type="checkbox"/>	Fällt bei BMW an z. B. für Vorratsberechnungen, aber sie sind nicht Teil des WIRE Tools, da diese Methode mathematisch schwer abbildbar ist.
3.2.3	Annuitätenmethode	<input type="checkbox"/>	Wird von BMW nicht verwendet.

Für die Ermittlung des Kapitalwerts werden die beiden Kostenaufstellungen gegenübergestellt und mithilfe der nachfolgenden Gleichung 5-1 der Kapitalwert berechnet.

$$K = -A_0 + \sum_{t=1}^n ((E_t - A_t)/(1 + i)^t) \quad (5-1)$$

Die angesetzte Nutzungsdauer n von sieben Jahren basiert auf der bei BMW üblichen Abschreibungsdauer für vergleichbare Investitionen. Weiterhin wird der von BMW geforderte Kalkulationszinssatz i von 35 % jährlich angesetzt. Die jährliche Steigerung der Personalkosten beträgt 2,5 %. Für die Bestimmung aller Ein- und Auszahlungen der Investitionen sowie deren jeweiligen Zeitpunkten ist zu beachten, dass sich bei Transportprozessen keine direkten Einzahlungen zurechnen lassen. Es handelt sich bei diesen Investitionen um reine Auszahlungen für eine Transportleistung, die üblicherweise zu den Gemeinkosten zählen. In der VDI-Richtlinie 2710 Blatt 4 heißt es

„Wenn, wie im hier vorliegenden Investitionsfall, keine Einnahmen vorliegen [...] werden für die verschiedenen Kostenarten die Zahlungsströme der Alternative FTS von den Zahlungsströmen der Alternative Gabelstapler subtrahiert. Positive Zahlungsdifferenzen werden dann als Einnahmen der Alternative Gabelstapler, negative Zahlungsdifferenzen als Auszahlungen der Alternative Gabelstapler bewertet.“ [VDI-2710-4, S. 16]. Im Falle des *TractEasy* ist die Alternative jedoch kein Gabelstapler, sondern der manuell betriebene Elektroschlepper P250.

Basierend auf der Annahme der Serienimplementierung des *TractEasy* im BMW-Werk Dingolfing sowie den anonymisierten bzw. normierten Werten liegt der Kapitalwert der Kostenersparnis nach sieben Jahren bei 43.082 €. Nach 3,51 Jahren amortisiert sich die Investition. Die Berechnung des Kapitalwerts sowie der Amortisationszeit sind dem Anhang C.2 zu entnehmen. Der berechnete Kapitalwert ist trotz der geforderten 35 % positiv, was auf Seiten von BMW für eine Weiterverfolgung der Investition/Maßnahme spricht. Allerdings müssen hier die Annahmen, welche getroffen wurden, berücksichtigt werden.

Erst nach der ausführlichen Prüfung der Wirtschaftlichkeit ist eine Serienimplementierung möglich. Ist die geforderte Wirtschaftlichkeit nicht gegeben, so wird die Investition/Maßnahme erneut geprüft oder aber nicht weiterverfolgt. Neben der monetären Bewertung spielen auch nicht-monetäre Faktoren bei der Entscheidung für oder gegen eine Investition/Maßnahme eine wichtige Rolle. Hierzu gehören z. B. Sicherheit, Nachhaltigkeitsaspekte, Geschwindigkeit oder Mitarbeiterentlastung.

5.3 Reflexion und Diskussion der Anwendung der Gestaltungsrichtlinien in Form von Checklisten

Die Checklisten liefern eine Zusammenstellung relevanter Planungsschritte für die Implementierung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich. Das bedeutet allerdings nicht zwangsläufig, dass alle Schritte durchgeführt werden müssen. Die Gestaltungsrichtlinien und somit auch die Checklisten sollen vielmehr eine Liste der Punkte darstellen, welche für eine Planung berücksichtigt werden sollten. Sie stellen somit einen Planungskatalog dar und wirken dadurch dem Auslassen oder Vergessen relevanter Planungsschritte entgegen.

Wie der Anwendung in Abschnitt 5.2 zu entnehmen ist, wurden einige Planungsschritte ausgelassen, was nicht gleich negativ zu bewerten ist. Im Fall der Checkliste – Prozessanalyse auf dem Werksgelände – wurden von den Betreibern im BMW-Werk Dingolfing einzelne Schritte übersprungen, da sie diese zum Teil vom manuellen Prozess

übernehmen konnten oder da detailliertere Schritte, wie die Erstellung eines Ablaufdiagramms oder einer umfassenden Materialflussanalyse, erst für die Serienimplementierung vorgenommen werden. Trotz dem Auslassen einzelner Planungsschritte erweist sich die Checkliste der Prozessanalyse nach Aussage von BMW als wichtiges und nützliches Planungswerkzeug, welches eine fundierte Grundlage für die Serieneinführung schafft und darüber hinaus auch für weitere Automatisierungsvorhaben verwendet werden kann.

Die Durchführung der Checkliste – Technische Machbarkeitsprüfung unterstützt nicht nur EasyMile – seinen AMR technisch einzuordnen, sondern ermöglicht auch BMW einen detaillierten Blick auf die technischen Fähigkeiten des Roboters. Folglich wurde durch die Checkliste ein technisches Verständnis auf Seiten von BMW geschaffen, welches sich positiv auf die Planung und Implementierung des *TractEasy* auswirkt.

Die Checkliste für das umfassende Sicherheitssystem wurde bis auf zwei Teilschritte, die EasyMile technisch begründen konnte, ausgefüllt. Auch hier liefert die Checkliste einen erheblichen Wissensbeitrag für den Anwender und Hersteller des AMR. Des Weiteren liegt EasyMile eine Liste derer Punkte vor, welche für die Sicherheit des AMR ausschlaggebend sind. Das systematische Abarbeiten der Checkliste trägt aus Sicht von EasyMile zur Transparenz und zum sicherheitstechnischen Verständnis zwischen Hersteller und Anwender bei.

Nach der Durchführung der Checkliste – Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem – wurde ersichtlich, dass der *TractEasy* auf der Ausführungsebene eine hohe, auf der Planungs- und Steuerungsebene hingegen nur eine geringe Autonomiestufe aufweist. Dass der *TractEasy* auf Seiten von EasyMile als autonomes Fahrzeug bezeichnet wird, ist somit nicht falsch. Nach der Definition intralogistischer Systeme (vgl. Abschnitt 2.1.4) bezieht sich diese Autonomie allerdings nicht auf jede Aufgabenebene, beispielsweise erfolgt keine automatische Anpassung der Fahrroute im Fall von Hindernissen. Wurde keine zusätzliche Alternativroute einprogrammiert, so bleibt der *TractEasy* vor dem Hindernis stehen. Mithilfe der Einordnung des Roboters in die Klassifizierungsmatrix (vgl. Abbildung 5-14) werden die Autonomiestufen der einzelnen Aufgabenebenen transparent dargestellt und liefern somit entscheidende Informationen über den Autonomiegrad des *TractEasy*. Umso „autonom“ das Fahrzeug auf der Aufgabenebene agieren kann, desto unterschiedlicher fällt die technische Machbarkeit und das Sicherheitssystem aus. Die geringen Autonomiestufen des *TractEasy* auf den Planungs- und Steuerungsebenen ergeben sich insbesondere aus der technischen Komplexität sowie der noch zu geringen Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Systeme.

Vor allem diese beiden Aspekte spielen für die Serienimplementierung eine entscheidende Rolle. Daher findet zwar intensive Forschung und Entwicklung zur autonomen Planung- und Steuerung statt, sie wird aber bei aktuell am Markt verfügbaren AMRs im Outdoor-Bereich nur bedingt eingesetzt, da die Systeme andernfalls die gewünschte Verfügbarkeit von bis zu 98 % nicht sicherstellen können. Hier stellt sich die Frage, ob hohe Autonomiestufen auf allen Aufgabenebenen überhaupt gewünscht sind. Ist dies der Fall, so muss zum aktuellen Stand der Technik auf eine hohe Verfügbarkeit verzichtet werden. Nach Angabe von BMW spielt der OEE-Wert, in dem die Verfügbarkeit einen Faktor darstellt, eine wichtige Rolle für die Bewertung und Entscheidung des weiteren Projektverlaufs. Somit akzeptiert BMW, dass der *TractEasy* auf der Planungs- und Steuerungsebene primär vom Menschen abhängig ist, dafür aber einen selbständigen und stabilen Materialtransport auf der Ausführungsebene gewährleisten kann. Schon allein der autonome Materialtransport im Outdoor-Bereich stellt eine herausfordernde Aufgabe für die Technik von AMRs dar.

Damit ein reales Abbild der Kostenanalyse aufgezeigt werden kann, wurde im Rahmen der letzten Checkliste die Annahme getroffen, den *TractEasy* bereits in die Serie zu überführen. Ausgehend davon bildet diese Checkliste sowohl für BMW als auch für EasyMile eine hilfreiche und strukturierte Zusammenstellung relevanter Kostenpunkte ab. Sie trägt somit ebenfalls zur Vollständigkeit und Transparenz bei und liefert eine wirtschaftliche Darstellung der Kosten sowie einer Gegenüberstellung dieser. Für BMW spielt bei der Gegenüberstellung der Kosten nur die Kapitalwertmethode eine Rolle.

Zusammenfassend erweisen sich die Gestaltungsrichtlinien in Form von Checklisten in der praktischen Anwendung als eine hilfreiche und strukturierte Planungsunterstützung bei der Implementierung von AMRs auf dem Werksgelände. Ausgehend von den fünf Gestaltungsfeldern, die in Abbildung 4-5 die fünf Säulen eines Hauses darstellen, bis zu den einzelnen Planungsschritten, die sich zum Teil in weitere Schritte unterteilen, liefern die Richtlinien einen umfassenden Planungsüberblick und geben nützliche Hinweise und Informationen zum Prozess, zur Technik, zur Sicherheit und Steuerung sowie zu den Kosten eines AMR. Somit lassen sich auch komplexe Implementierungsvorhaben strukturiert und transparent durchführen. Insbesondere für Anwender, welche die Einführung autonomer mobiler Roboter im Outdoor-Bereich projektieren und kaum Vorkenntnisse besitzen, liefern die Gestaltungsrichtlinien in Form von Checklisten eine fundierte Planungsgrundlage.

Hersteller von AMRs werden mithilfe der Richtlinien bei der technischen Gestaltung der Roboter unter Berücksichtigung prozessualer, sicherheitsrelevanter und planungs-

technischer Aspekte unterstützt. Dabei können die Planungsschritte je nach Anwenderwunsch durchaus variieren und unterschiedliche Schwerpunkte aufweisen. Das primäre Ziel der Gestaltungsrichtlinien ist es jedoch, ein möglichst standardisiertes Vorgehen mit den relevanten Gestaltungsfeldern und dazugehörigen Lösungsvorschlägen für die Implementierung von AMRs auf dem Werksgelände zu liefern.

Dabei sind die Richtlinien keinesfalls auf Anwendungsfälle bzw. Einsätze in der Automobilindustrie begrenzt, sondern können auch in weiteren Industriezweigen, bei denen ein Materialtransport außerhalb der Hallen stattfindet, Verwendung finden. Das gesamte Vorgehensmodell eignet sich zudem für die Erstellung von Gestaltungsrichtlinien für weitere Robotertypen mit unterschiedlichen Funktionen und innerhalb verschiedener Anwendungsfälle, wie beispielsweise autonome Kommissionierroboter im Indoor-Bereich oder Serviceroboter in Pflegeeinrichtungen und Krankenhäusern.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Die Implementierung intelligenter Materialflusssysteme im Outdoor-Bereich wird durch den anhaltenden Kostendruck, repetitive und monotone Tätigkeiten sowie die Digitalisierung und der im Zuge dessen vermehrten Automatisierung innerhalb der Logistik vorangetrieben und stellt sowohl für Anwender als auch für Hersteller solcher Systeme eine herausfordernde Planungsaufgabe dar. Dabei fehlt es Anwendern vor allem an Expertise in technischen, organisatorischen und prozessualen Bereichen. Hersteller tun sich insbesondere bei der technischen Gestaltung von AMRs schwer, da es ihnen schlichtweg an konkreten Anforderungen fehlt oder ihnen diese nicht bekannt sind. Für die strukturierte und transparente Vorgehensweise bei der Entwicklung eines AMR bis hin zur Einführung in den Outdoor-Betrieb liefern die in dieser Arbeit entwickelten Gestaltungsrichtlinien eine fundierte Planungsunterstützung.

Ausgehend von den in Kapitel 2 aufgezeigten Technologien im Bereich Autonomes Fahren und FTS im Indoor-Bereich sind Unterschiede und Gemeinsamkeiten zu Outdoor-AMRs diskutiert und aufgezeigt worden. Es ist deutlich geworden, dass die Technologien nicht eins zu eins übertragbar sind, sich allerdings in einzelnen Bereichen, wie der Zusammensetzung unterschiedlicher Sensorik hardware- und softwareseitig, Synergien ergeben können. Des Weiteren ist der Autonomiebegriff durch die im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten Klassifizierungsmatrix für intralogistische Systeme eingeordnet und definiert worden. Diese Einordnung und Definition leisten einen wichtigen Beitrag zur Forschung und Wissenschaft sowie zum Verständnis dieser Arbeit.

Die Recherche phasenbezogener Vorgehensmodelle, Designtheorien und -methoden sowie grafischer Modellierungssprachen bilden die einzelnen Bausteine des Vorgehensmodells. Es wurden unterschiedliche Methoden und Modelle aufgezeigt, erläutert und diskutiert. Letztendlich führten Bewertungen, welche sich an der Zielsetzung dieser Forschungsarbeit orientieren, zur Auswahl der am besten geeigneten Methoden und Modelle. Als Ergebnis wurden das V-Modell XT, Axiomatic Design und BPMN ausgewählt. Sie stellen das wissenschaftlich basierte Grundgerüst des Vorgehensmodells dar.

Nach dem Aufzeigen des Forschungsbedarfes und der Aufstellung der Forschungshypothesen in Form von Fragen ist eine Prozessanalyse am Beispiel des BMW-Werks

München durchgeführt worden. Auf Basis dieser Analyse konnte die Vielfalt und Komplexität von Outdoor-Transportprozessen transparent und unter realen Bedingungen aufgezeigt werden. Mithilfe von SWOT-Analysen sind die aufgenommen Prozesse klassifiziert und bewertet worden. Anschließend wurden daraus Referenzprozessbausteine abgeleitet. Diese wiederum ermöglichen eine Adaption der identifizierten Outdoor-Transportprozesse auf weitere Anwendungsfälle, auch außerhalb der Automobilindustrie. Neben der Beschreibung und Visualisierung der Referenzprozessbausteine sind ebenfalls Prozessziele, welche in die Konzeption des Vorgehensmodells eingeflossen sind, definiert worden.

Die Konzeption des Vorgehensmodells unter Verwendung von Axiomatic Design lieferte einen strukturierten und systematischen Gestaltungsentwurf für die Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände. Der Beitrag aus der Literaturrecherche in Abschnitt 2.1, der Prozessanalyse in Kapitel 3 sowie den Experteninterviews im Rahmen der in dieser Forschungsarbeit durchgeführten Studie stellten repräsentative Kundenwünsche dar. Diese waren die Ausgangsbasis von Axiomatic Design. Nach dem Top-Down-Prinzip wurden daraufhin die Kundenwünsche in konkrete Anforderungen überführt und mithilfe von Dekompositionen in weitere Teilanforderungen zerlegt sowie daraufhin Lösungsparametern zugeordnet.

Diesen Lösungsparametern wiederum wurden fünf übergeordnete Gestaltungsfelder zugeordnet. Das erste Gestaltungsfeld, die Prozessverbesserung beinhaltet Anforderungen, Metriken und Lösungsparameter zum automatisierten Prozess. Es wurde aufgezeigt wie Prozesse mit dem größten Automatisierungspotenzial aufgedeckt werden können. Die technische Machbarkeit stellt das zweite Gestaltungsfeld dar und gibt Aufschluss über die Technik des Roboters sowie dessen Fähigkeiten. Im dritten Gestaltungsfeld wurden sicherheitsrelevante Anforderungen zusammengefasst und entsprechende Lösungsparameter zugeordnet. Die Selbständigkeit des Roboters in Bezug auf Handlungen und Entscheidungen ist Bestandteil des vierten Gestaltungsfeldes. Zuletzt sind die Schritte für die Bewertung der Wirtschaftlichkeit aufgezeigt sowie eine Kapitalwertmethode durchgeführt worden.

Für die praktische Anwendung ist das wissenschaftlich erarbeitete Vorgehensmodell in handhabbare Gestaltungsrichtlinien und Checklisten überführt worden.

Die demonstratorische Umsetzung der Gestaltungsrichtlinien am Beispiel der Pilotierung des *TractEasy* im BMW-Werk Dingolfing zeigte die praktische Anwendung der Richtlinien in Form von Checklisten auf und diente zugleich als Validierung des gesamten Vorgehensmodells. Als Ergebnis wurde festgehalten, dass sich die Gestaltungsrichtlinien in Form von Checklisten als ein hilfreiches Planungswerkzeug für die

praktische Anwendung erwiesen haben. Auf Basis der ausgefüllten Checklisten von EasyMile und den Betreibern im BMW-Werk Dingolfing ist zwei Monate später die Auslieferung des *TractEasy* nach Dingolfing erfolgt und es wurde mit der sechsmonatigen Pilotphase begonnen.

Nachfolgend wird weiteres Forschungspotenzial abgeleitet und ein Ausblick im Bereich der autonomen mobilen Roboter gegeben.

6.2 Weiteres Forschungspotenzial

Die vorliegende Forschungsarbeit weist Potenziale für weitere Forschung und Entwicklung auf. Die erarbeiteten Gestaltungsrichtlinien, welche das Ergebnis des Vorgehensmodells darstellen, basieren auf ermittelten Kundenwünschen, welche wiederum in Anforderungen übersetzt und mithilfe von Dekompositionen und Metriken in konkrete Lösungsparameter überführt wurden. Eine kontinuierliche Überprüfung der Kundenwünsche auf Anwender- und Herstellerseite ist unbedingt erforderlich, da sich durch ökonomisch, ökologische, soziale, rechtliche und technische Einflüsse Kundenwünsche und somit auch Anforderungen ändern. Dies zeigt, dass das in dieser Forschungsarbeit vorgestellte Vorgehensmodell zur Ermittlung der Gestaltungsrichtlinien auch dann Verwendung findet, wenn sich Kundenwünsche oder -anforderungen kurzfristig ändern. Die Grundstruktur des Vorgehensmodells sowie die einzelnen Schritte bei der Durchführung der Dekompositionen bleiben unabhängig von Änderungen bestehen. Es müssen ausschließlich die Inhalte angepasst werden. Werden beispielsweise AMRs im Indoor-Bereich implementiert, spielt die Outdoor-Fähigkeit kaum bis keine Rolle, wohingegen die Indoor-Anwendung Einfluss auf beispielsweise die Netzanbindung (Verwendung von GPS im Indoor-Bereich) haben kann.

Das im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte Vorgehensmodell ist somit adaptierbar auf weitere Anwendungsfälle und Industrien. Die erarbeiteten Gestaltungsrichtlinien richten sich hingegen speziell an die Implementierung von AMRs auf dem Werksgelände. Demnach bietet es sich an, das Vorgehensmodell anhand von weiteren Anwendungsfällen und innerhalb unterschiedlicher Industrien anzuwenden und zu validieren sowie gegebenenfalls zu erweitern.

Die sich aus den Gestaltungsrichtlinien ergebenden Checklisten sorgen für eine transparente und strukturierte Planung und Durchführung. Um die Benutzerfreundlichkeit zu erhöhen, ist eine Übertragung der Checklisten in ein einheitliches Excel-Format empfehlenswert. Durch die digitale Bearbeitung und Ablage der Checklisten ist eine einfachere Handhabung und Weitergabe der Daten und Informationen möglich.

Die Entwicklung im Bereich FTS, Robotik und Autonomes Fahren schreitet rasant voran, was sich analog auf AMRs im Outdoor-Bereich auswirkt. Neben der technischen Entwicklung ist es allerdings genauso wichtig, die Anwendung im Outdoor-Bereich sowie innerhalb unterschiedlicher Industrien weiter voranzutreiben. Umso mehr unter realen Bedingungen getestet wird, desto mehr Erfahrungen und Expertise können Hersteller und Anwender von AMRs sammeln. Die im Rahmen dieser Forschungsarbeit durchgeführte Studie unterstreicht diese Aussage [Cla-2019]. Der Mangel an einem flächendeckenden Einsatz von AMRs im Outdoor-Bereich ist vor allem der noch zu hohen Komplexität und zu geringen Verfügbarkeit der Systeme geschuldet.

Des Weiteren spiegelt sich die Komplexität der Technik in erhöhten Kosten wider, wie z. B. für die Sensorik. Derzeitig sind AMRs im Outdoor-Bereich für viele Anwender noch nicht wirtschaftlich, da die Kosten der Technik des AMR die Personalkosten des manuellen Referenzprozesses, insbesondere in Niedriglohnländern, übersteigen [Cla-2019, S. 47ff.]. An dieser Stelle empfiehlt es sich mithilfe der in dieser Arbeit entwickelten Klassifizierungsmatrix abzuwägen, wie autonom bzw. weniger autonom ein mobiler Roboter für den jeweiligen Anwendungsfall sein muss. Im Vergleich zu Indoor-FTS zeichnen sich die aktuell am Markt verfügbaren Outdoor-AMRs durch eine höhere Autonomiestufe auf den einzelnen Aufgabenebenen aus.

Ein weiterer entscheidender Forschungsbereich ist die Weiterentwicklung des maschinellen Lernens, welches essenziell für den Autonomiegrad des Roboters ist. Die komplexe Algorithmik sowie die Vielzahl von unvorhersehbaren und unkalkulierbaren Situationen stellt eine große Herausforderung für die Programmierlogik dar [Cla-2019, S. 47ff.].

Mithilfe der entwickelten Gestaltungsrichtlinien ist ein wichtiger Baustein für die prozessuale, technische und organisatorische Planung und Umsetzung von AMRs auf dem Werksgelände gelegt worden. Somit konnten bislang fehlende Richtlinien und Standards für die Implementierung von AMRs im Outdoor-Bereich etabliert werden. Auch an dieser Stelle besteht Potenzial für weitere Forschung, beispielsweise im Bereich der Normen und Standards. Hier ist die eindeutige und klare Abgrenzung des Handlungsspielraumes eines AMR für die Interaktion mit weiteren Verkehrsteilnehmern besonders hervorzuheben.

6.3 Ausblick im Bereich autonomer mobiler Roboter

Die Logistik ist eine sich stetig verändernde Branche, welche stark von exogenen Einflüssen getrieben wird. So wirkt sich der anhaltende Trend zur Digitalisierung genauso

stark aus wie der Kostendruck in der Logistik auf die Waren-, Material- und Informationsflüsse. Zudem stellt sich die Frage, ob exogene Einflüsse, wie beispielsweise die Corona-Pandemie die Digitalisierung vorantreiben. Eine aktuelle Studie des Capgemini Research Institute belegt diese Hypothese. Demnach hat sich von 2018 bis 2020 der Anteil an Unternehmen, welche digitale Transformationen angehen, verdoppelt [Cru-2020].

Der Kostendruck sowie die Digitalisierung sind allerdings nicht die einzigen Treiber. Es sind vor allem auch die höhere Produktivität und Sicherheit, die geringeren Transportschäden sowie die höhere Flexibilität und Agilität, die sich Anwender von autonomen mobilen Robotern versprechen. Insbesondere der Outdoor-Bereich, welcher eine geringere Automatisierung als der Indoor-Bereich aufweist und ein entscheidendes Bindeglied zwischen Wareneingang und Bedarfsort darstellt, erlangt vermehrt an Aufmerksamkeit. Die Vernetzung des gesamten Materialflusses spielt hierbei eine entscheidende Rolle. AMRs im Outdoor-Bereich interagieren mit Drohnen, weiteren AMRs oder Handling-Robotern im Indoor-Bereich.

Neben dem Outdoor-Bereich ist der Autonomiegedanke mobiler Roboter ein weiterer intensiv diskutierter Aspekt, welcher sowohl durch das Autonome Fahren auf öffentlicher Straße als auch durch „*smarte Indoor-Anwendungen*“ an Relevanz gewinnt. Die Technik lässt bereits hohe Autonomiestufen zu, beispielsweise mithilfe von KI. Es scheitert allerdings häufig an den bestehenden Prozessen. Dabei müssen die Prozesse noch nicht einmal schlecht geplant oder gestaltet sein, sie sind schlichtweg für manuelle oder nur zum Teil automatisierte Abläufe entworfen, nicht aber für autonome Transportsysteme. Wird ein einzelner Prozess in einer primär manuell-betriebenen Umgebung und Infrastruktur durch ein AMR „*autonomisiert*“, so können mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht alle Potenziale eines AMR voll ausgeschöpft werden. Wird hingegen ein Werk neu geplant und ist der Einsatz von AMRs vorgesehen, so ergeben sich insbesondere hinsichtlich der Prozesse Vorteile bei der Implementierung. Die AMRs werden von Beginn an mit in die Planung einbezogenen. Demnach können Prozesse entsprechend den Anforderungen von Robotern geplant und ausgelegt werden.

Neben dem prozessualen ist auch der ethisch-moralische Aspekt nicht zu vernachlässigen. Die zunehmende Autonomie mobiler Roboter erfordert die Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen, die in einem Handlungskontext getroffen werden müssen [Dec-2019, S. 135]. Dieser Aspekt beinhaltet zwei elementare Voraussetzungen: Vertrauen in die Technik setzen und Verantwortung an das System abgeben. Gerade wenn es sich um neuartige Technologien wie AMRs im Outdoor-Bereich handelt und kaum bis wenig Wissen über diese Systeme vorhanden ist, sind Anwender skeptisch sie einzusetzen.

Das fehlende Vertrauen in die Technik autonomer Systeme spiegelt sich dabei insbesondere in Sicherheitsthematiken wider. Beispielsweise besitzen autonome sowie ebenfalls automatisierte Systeme deutlich höhere Sicherheitsanforderungen als manuell betriebene Systeme. Es müssen Sicherheitsvorkehrungen getroffen werden, die bei einem manuellen Prozess nicht einmal betrachtet werden. Die Voraussetzung Verantwortung an das System abzugeben, geht häufig einher mit der Angst des Kontrollverlustes über das System bzw. den Roboter.

Ist es überhaupt gewollt dem Roboter zukünftig Planungs- und Steuerungsaufgaben, die aktuell der Mensch verantwortet, zu übergeben? Oder ist es völlig ausreichend ausschließlich die Ausführungsebene zu automatisieren und Entscheidungen weiterhin dem Menschen zu überlassen? Im Rahmen der demonstratorischen Umsetzung in dieser Arbeit wurde deutlich, dass der eingesetzte AMR kaum über Autonomie auf der Planungs- und Steuerungsebene verfügt. Nach Aussage des AMR-Herstellers wären unter Voraussetzung der entsprechenden Ressourcen höhere Autonomiestufen durchaus möglich, es wird allerdings derzeit kaum nachgefragt. Der Fokus der Anwender liegt zunächst in der Outdoor-Befähigung dieser Systeme. Die Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit sind hierbei die ausschlaggebenden Messgrößen. Gleichmaßen sollen mobile Roboter flexibel und agil sein. Klassische FTS erfüllen bereits die geforderte Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit. In Bezug auf Flexibilität und Agilität ist der Mensch dem FTS hingegen weit voraus. Gerade in einer von Volatilität, Unsicherheit, Komplexität und Mehrdeutigkeit geprägten Welt (VUCA) spielen Flexibilität und Agilität, aber zugleich auch Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit eine immer größere Rolle.

Das Stichwort „*Resiliente Supply Chain*“, welches eine robuste, belastbare und zugleich elastische Versorgungskette fordert, ist im Krisenjahr 2020 Bestandteil jeder Debatte und Diskussion innerhalb der Logistik. Das Potenzial, diese Forderungen gleichermaßen zu erfüllen, bieten AMRs. Der Sprung von einer zum großen Teil manuell betriebenen hin zu einer vollständig autonomen Intralogistik ist allerdings kurzfristig nicht möglich. Schritt für Schritt müssen einzelne Prozesse unter Berücksichtigung des gesamten Waren-, Material- und Informationsflusses sowie einer schrittweisen Anhebung der Autonomiestufen auf den unterschiedlichen Aufgabenebenen angepasst werden. Technologien, wie die Teleoperation, können an dieser Stelle eine vielversprechende Brücke zwischen manuell bzw. teil-automatisiert und autonom darstellen [Sch-2020]. Durch Teleoperation können mobile Roboter wie Transportfahrzeuge eine höhere Stufe der Autonomie auf unterschiedlichen Aufgabenebenen erreichen. Die Rückfallebene „*Mensch*“ ist allerdings immer noch gegeben, da eine Person „*remote*“ einen oder mehrere Roboter überwacht sowie gegebenenfalls eingreift und steuert [Sch-2021]. Startups, wie Fernride, Phantom Auto's oder Pylot haben sich auf

die Technologie der Teleoperation spezialisiert und sehen sie als den essenziellen Schritt Richtung einer höheren Autonomie [Fer-2020] [Pha-2020] [Kra-2020].

Neben den Potenzialen und Herausforderungen, die der Outdoor-Bereich sowie die Autonomie bieten, sind es häufig auch die bereits zuvor erwähnten hohen Kosten eines AMR, die Anwender von einer Implementierung abhalten. AMRs sind hochkomplexe Systeme mit einer ressourcenintensiven Forschung und Entwicklung. Um dem entgegenzuwirken, besteht die Möglichkeit zur Auslagerung datenintensiver, latenzkritischer und sicherheitsrelevanter Edge-Komponenten am Roboter in eine Cloud. Der neue Mobilfunkstandard 5G macht dies möglich. Höhere Datenraten, Echtzeitübertragung sowie Latenzzeiten von wenigen Millisekunden erlauben es beispielsweise, Auswertungen und Berechnungen von Kameradaten für die Navigation oder Detektion auszulagern und somit freie Rechenkapazitäten am Roboter zu schaffen. Anhand solch einer Auslagerung können die Kosten des Roboters deutlich reduziert werden. Denn insbesondere die Sensorik und damit verbundene Datenauswertung und -berechnung sind kostenintensiv. Neben dem Effekt der Kostenreduzierung, kann eine geringere Prozesszeit erreicht werden. Diese Effekte wirken sich besonders bei AMRs, die sowohl Transport- als auch Handhabungsaufgaben übernehmen, aus. Hierzu zählen z. B. autonome Stapler.

Aktuell beansprucht das Detektieren und Positionieren der aufzunehmenden Waren und das anschließende Navigieren zum Abstellort unter den gegebenen Sicherheitsvorkehrungen mehr Zeit als bei einem manuell durchgeführten Prozess. Um diese Schwachstelle zu komprimieren, bietet die Auslagerung in eine Cloud eine schnellere und echtzeitfähige Datenberechnung und somit geringere Prozesszeiten. Allerdings dürfen die Anschaffungs- und laufenden Kosten der Cloud und deren Service nicht vernachlässigt werden. Durch das Auslagern der Daten mehrerer AMRs kann eine höhere Skalierbarkeit erreicht werden. Des Weiteren ist es denkbar, den bereits in dieser Forschungsarbeit erwähnten globalen Koordinator in Form einer IoT-Plattform in die Cloud zu integrieren. Somit behält jeder Roboter auf lokaler Ebene seine eigene Entscheidungsmacht, globale Informationen werden den einzelnen AMRs hingegen vom Koordinator in die Cloud übermittelt. Dies führt zu immensen Datenmengen, welche vom AMR und seinem gesamten System ausgehen. Das Konsolidieren, Aufbereiten und Auswerten dieser Daten nimmt mit höheren Autonomiestufen der einzelnen Aufgabenebenen deutlich zu. Um Entscheidungen auf Planungs- und Steuerungsebene treffen zu können, muss der AMR über die notwendigen Informationen und Daten verfügen und diese gegebenenfalls auch speichern, um sie zu einem späteren Zeitpunkt wieder abrufen oder im Rahmen des maschinellen Lernens aus ihnen lernen zu können. Dabei sollten insbesondere Aspekte der Daten- und Netzwerksicherheit und des Datenzugriffs sowie des geistigen Eigentums intensiver betrachtet werden.

Von einer flächendeckenden Implementierung autonomer mobiler Roboter auf dem Werksgelände ist die Intralogistik noch weit entfernt. Zweifellos ist sie jedoch die Branche, welche das größte Potenzial für solch einen flächendeckenden Einsatz aufweist. Nach der von *Gartner Inc.* veröffentlichten „*Priority Matrix for Supply Chain Execution Technologies*“ wird dieser flächendeckende Einsatz von AMRs allerdings nicht innerhalb der nächsten Jahre, sondern erst in fünf bis zehn Jahren prognostiziert [Gar-2020]. Die Intralogistik und insbesondere die Automobilindustrie platzieren sich hier als Vorreiter erster Implementierungen von AMRs im Outdoor-Bereich. Auf Basis erster Pilot-Anwendungen und dem kontinuierlichen Aufbau technischer, organisatorischer und prozessualer Expertise liefern die in dieser Forschungsarbeit entwickelten Gestaltungsrichtlinien eine strukturierte Vorgehensweise und Ausgangsbasis für die Zukunft der Intralogistik.

Literaturverzeichnis

- [Ael-2013] Aelker, J.; Bauernhansl, T.; Ehm, H.: Managing Complexity in Supply Chains: A Discussion of Current Approaches on the Example of the Semiconductor Industry. In: *Procedia CIRP*, Jg. 7 (2013), S. 79–84.
- [AIA-2019] AIAG & VDA: Failure Mode and Effects Analysis - FMEA Handbook – Design FMEA, process FMEA, supplemental FMEA for monitoring & system response. Automotive Industry Action Group; [Verband der Automobilindustrie], Southfield, Michigan, [Berlin], 2019.
- [Aka-1990] Akao, Y.: Quality function deployment – Integrating customer requirements into product design, 1990.
- [Alb-2007] Albers, S. (Hrsg.): Handbuch Produktmanagement – Strategieentwicklung - Produktplanung - Organisation - Kontrolle. Gabler, Wiesbaden, 2007.
- [Ale-1979] Alexander, C.: The timeless way of building. Oxford Univ. Press, New York, NY, 1979.
- [Arn-2006] Arnold, D.: Intralogistik – Potentiale, Perspektiven, Prognosen. Springer-Verlag GmbH, Berlin Heidelberg, 2006.
- [Ash-2015] Ashrafian, H.: Intelligent robots must uphold human rights. In: *Nature*, Jg. 519 (2015) Nr. 7544, S. 391.
- [Aus-1996] Austin, R. D.: Measuring and managing performance in organizations. Dorset House Publ, New York, 1996.
- [Bad-2021] Badue, C.; Guidolini, R.; Carneiro, R. V.; Azevedo, P.; Cardoso, V. B.; Forechi, A.; Jesus, L.; Berriel, R.; Paixão, T. M.; Mutz, F.; Paula Veronese, L. de; Oliveira-Santos, T.; Souza, A. F. de: Self-driving cars: A survey. In: *Expert Systems with Applications*, Jg. 165 (2021), S. 113816.
- [Bai-2006] Bailey, T.; Durrant-Whyte, H.: Simultaneous localization and mapping (SLAM): part II. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine*, Jg. 13 (2006) Nr. 3, S. 108–117.

- [Bal-1998] Balzert, H.: Software-Management, Software-Qualitätssicherung, Unternehmensmodellierung. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1998.
- [Ban-1995] Banyard, P.; Gerstenmaier, J.; Holler, P. (Hrsg.): Einführung in die Kognitionspsychologie – Mit 9 Tabellen. Reinhardt, München, 1995.
- [Bän-2019] Bänziger, T.: Intelligente Montageassistenten: Konzepte zur Planung und Programmierung der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter, ETH Zurich, 2019.
- [Bas-2016] Bast, H.; Delling, D. D.; Goldberg, A.; Müller-Hannenmann, M.; Pajor, T.; Sanders, P.; Wagner, D.; Werneck, R. F.: Route Planning in Transportation Networks. In: Kliemann, L.; Sanders, P. (Hrsg.): Algorithm Engineering. Springer International Publishing, Cham, 2016, S. 19–80.
- [Bec-2000] Becker, O.; Asher, J. B.; Ackerman, I.: A method for system interface reduction using N2 charts. In: Systems Engineering, Jg. 3 (2000) Nr. 1, S. 27–37.
- [Bec-2007] Beck, K.; Andres, C.: Extreme programming explained – Embrace change. Addison-Wesley, Boston, 2007.
- [Bec-2009] Becker, J.; Matha, C.; Winkelmann, A.: Geschäftsprozessmanagement. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Bee-2014] Beer, J. M.; Fisk, A. D.; Rogers, W. A.: Toward a framework for levels of robot autonomy in human-robot interaction. In: Journal of human-robot interaction, Jg. 3 (2014) Nr. 2, S. 74–99.
- [Bei-2015] Beiker, S. A.: Implementierung eines selbstfahrenden und individuell abrufbaren Personentransportsystems. In: Maurer, M., et al. (Hrsg.): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte, 2015, S. 287–307.
- [Ber-2010] Berman, S.; Edan, Y.: Intelligent Automatic Guided Vehicles. In: Dima, I.; Rigatos, G. (Hrsg.): Intelligent Industrial Systems. IGI Global, 2010, S. 1–17.

- [Bes-2017] Besenfelder, C.; Brüggelolte, M.; Austerjost, M.; Kämmerling, N.; Pötting, M.; Dr.-Ing. Christian Schwede; Schellert, M.: Paradigmenwechsel der Planung und Steuerung von Wertschöpfungsnetzen, 2017.
- [Bet-2019] Betz, J.; Wischnewski, A.; Heilmeier, A.; Nobis, F.; Stahl, T.; Hermansdorfer, L.; Lienkamp, M.: A Software Architecture for an Autonomous Racecar 2019 IEEE 89th Vehicular Technology Conference (VTC 2019-Spring), S. 1–6.
- [BGV-D27] Berufsgenossenschaft für Gesundheitsdienst und Wohlfahrtspflege – BGW: BGV D27 Unfallverhütungsvorschrift. BGV Nr. D27, 2005.
- [BMW-2018a] BMW Group Plant Munich: BMW Plant Munich – Flexibility. Innovation. Passion, 2018.
- [BMW-2018b] BMW Group Photo: AutoTrailer bewegt LKWs autonom im BMW Group Werk Leipzig. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/detail/P90331986/AutoTrailer-bewegt-LKWs-autonom-im-BMW-Group-Werk-Leipzig-11-2018>, Aufruf am 09.05.2022.
- [BMW-2019] BMW Group Photo: BMW Group Werk Dingolfing erprobt vollständig vernetzte Logistik. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/photo/compilation/T0305721DE/bmw-group-werk-dingolfing-erprobt-vollstaendig-vernetzte-logistik>, Aufruf am 09.05.2022.
- [Boe-1988] Boehm, B. W.: A spiral model of software development and enhancement. In: Computer, Jg. 21 (1988) Nr. 5, S. 61–72.
- [Bor-2009] Borg, U.: Inbetriebnahmekosten. Vortrag. Allianz Deutschland AG, 17.09.2009.
- [Bor-2019] Borst, D.; Ratke, M.; Bayhan, H.; Hompel, M. ten: Feldstudie zu einer FTS-Auftragsvergabe für die dezentral gesteuerte Produktionsversorgung in cyber-physischen Produktionssystemen, 2019.
- [Bös-2013] Bösing, K. D.: BPMN als neuer Modellierungsstandard? (2013), S. 121–127.
- [Bös-2014] Bösing, K. D.; Geldmacher, J.: Transformation einer EPK in eine formalisierte Methode (2014).

- [Bot-2008] Botsaris, P. N.; Anagnostopoulos, K. P.; Demesouka, O.: Using axiomatic design principles for designing a simple and innovative product: a case study. In: International Journal of Design Engineering, Jg. 1 (2008) Nr. 3, S. 300.
- [Bre-2017] Bresson, G.; Alsayed, Z.; Yu, L.; Glaser, S.: Simultaneous Localization and Mapping: A Survey of Current Trends in Autonomous Driving. In: IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Jg. 2 (2017) Nr. 3, S. 194–220.
- [Bre-2019] Brenner, N.; Lauber, A.; Eckert, C.; Sax, E.: Autonomous Driving of Commercial Vehicles within Cordoned Off Terminals Proceedings of the 5th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems, S. 521–527.
- [Brö-1995] Bröhl, A.-P. (Hrsg.): Das V-Modell – Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden. Oldenbourg, München, 1995.
- [Bro-2001] Browning, T. R.: Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions. In: IEEE Transactions on Engineering Management, Jg. 48 (2001) Nr. 3, S. 292–306.
- [Bro-2002] Browning, T. R.: Process integration using the design structure matrix. In: Systems Engineering, Jg. 5 (2002) Nr. 3, S. 180–193.
- [Bro-2005] Brown, C. A.: Teaching axiomatic design to engineers—Theory, applications, and software. In: Journal of Manufacturing Systems, Jg. 24 (2005) Nr. 3, S. 186–195.
- [Bro-2007] Broy, M.; Rumpe, B.: Modulare hierarchische Modellierung als Grundlage der Software- und Systementwicklung. In: Informatik-Spektrum, Jg. 30 (2007) Nr. 1, S. 3–18.
- [Bro-2013] Broy, M.; Kuhrmann, M.: Projektorganisation und Management im Software Engineering. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [Bro-2016] Brown, C. A.; Henley, R.: Metrics for Developing Functional Requirements and Selecting Design Parameters in Axiomatic Design. In: Procedia CIRP, Jg. 53 (2016), S. 113–118.

- [Bun-1996] Bundesministeriums der Justiz und für Verbraucherschutz: Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit – ArbSchG, 1996.
- [Bun-2018] Bundesministerium des Innern: Handbuch für Organisationsuntersuchungen und Personalbedarfsermittlung. Bundesverwaltungsamt Nr. 19, 2018.
- [Car-2001] Carter, R. A.; Anton, A. I.; Dagnino, A.; Williams, L.: Evolving beyond requirements creep: a risk-based evolutionary prototyping model. Proceedings Fifth IEEE International Symposium on Requirements Engineering, 2001, S. 94–101.
- [Čec-2020] Čech, M.; Wicher, P.; Lenort, R.; Malčic, T.; David, J.; Holman, D.; Staš, D.; Záruba, J.: Autonomous mobile robot technology for supplying assembly lines in the automotive industry. In: Acta logistica, Jg. 7 (2020) Nr. 2, S. 103–109.
- [Cha-2002] Chan, L.-K.; Wu, M.-L.: Quality function deployment: A literature review. In: European Journal of Operational Research, Jg. 143 (2002) Nr. 3, S. 463–497.
- [Chr-2001] Christaller, T.; Decker, M.; Gilsbach, M. J.; Hirzinger, G.; Lauterbach, K. W.; Schweighofer, E.; Schweitzer, G.; Sturma, D.: Robotik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2001.
- [Chu-2010] Chua, C. K.; Leong, K. F.; Lim, C. S.: Rapid prototyping – Principles and applications. World Scientific, New Jersey, London, Singapore, Beijing, Shanghai, Hong Kong, Taipei, Chennai, 2010.
- [Cla-2019] Clauer, D.; Fottner, J.: Einsatz von autonomen Transportsystemen auf dem Werksgelände – Aktueller Umsetzungsstand und Handlungsbedarf. fml - Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik; Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München, [Garching bei München], 2019.
- [Cla-2021a] Clauer, D.; Fottner, J.; Rauch, E.; Roman, G.; Irrenhauser, T.: Technical Design Approach for Autonomous Outdoor Transport Systems based on an Extension of Axiomatic Design using Metrics. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Jg. 1174 (2021) Nr. 1, S. 12010.

- [Cla-2021b] Clauer, D.; Fottner, J.; Rauch, E.; Prüglmeier, M.: Usage of Autonomous Mobile Robots Outdoors - an Axiomatic Design Approach. In: Procedia CIRP, Jg. 96 (2021) Nr. 2, S. 242–247.
- [Coc-2016] Cochran, D. S.; Hendricks, S.; Barnes, J.; Bi, Z.: Extension of Manufacturing System Design Decomposition to Implement Manufacturing Systems That are Sustainable. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, Jg. 138 (2016) Nr. 10, S. 249.
- [Com-2020] Computing Community Consortium (CCC): A Roadmap for US Robotics – From Internet to Robotics. The American Society of Mechanical Engineers, 2020.
- [Cru-2020] Crummenerl, C.; Bjurström, K.; Tolido, R.; Boreel, M.; Shankavaram, D.; Reinertsen, K. T.; Buvat, J.; Khemka, Y.; Slatter, M.; B, A.: Digital Mastery – How organizations have progressed in their digital transformations over the past two years, 2020.
- [Dau-2018] Daunis, J.: Die Bedeutung von 5G und Internet of Things für das automatisierte Fahren. In: Sonderprojekte ATZ/MTZ, Jg. 23 (2018) Nr. S2, S. 18–21.
- [DB-2020] DB Schenker: DB Schenker implements driverless forklift truck. <https://www.dbschenker.com/global/about/press/agilox-driverless-forklift-truck-622732>, Aufruf am 09.05.2022.
- [Dec-2019] Decker, M.: Autonome Systeme und ethische Reflexion. In: Thimm, C.; Bächle, T. C. (Hrsg.): Die Maschine: Freund oder Feind? Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2019, S. 135–158.
- [Deu-2011] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV): Flurförderzeuge – Unfallverhütungsvorschrift vom 1. Januar 2011 mit Durchführungsanweisungen in der aktualisierten Fassung vom April 2004. Jedermann-Verl., Heidelberg, 2011.
- [Dia-2013] Dias, A.; Almeida, J.; Silva, E.; Lima, P.: Multi-robot cooperative stereo for outdoor scenarios, 13th International Conference on Autonomous Robot Systems, 2013, S. 1–6.
- [Die-2017] Dietrich, S.; May, G.; Wetter, O.; Heeren, H.; Fohler, G.: Performance Indicators and Use Case Analysis for Wireless Networks in Factory Automation 2017 22nd IEEE International Conference on

- Emerging Technologies and Factory Automation. IEEE, Piscataway, NJ, 2017, S. 1–8.
- [Die-2007] Dietrich, E.; Schulze, A.; Weber, S.: Kennzahlensystem für die Qualitätsbeurteilung in der industriellen Produktion – Q-DAS CAMERA Konzept. Carl Hanser Fachbuchverlag, s.l., 2007.
- [Die-2008] Dieter, G. E.; Schmidt, L. C.: Engineering design. McGraw-Hill Higher Education, New York, NY, 2008.
- [DIN-13312] DIN: Navigation_- Begriffe, Abkürzungen, Formelzeichen, graphische Symbole. DIN Nr. 13312:2005-02, 2005.
- [DIN-60529] DIN EN: Schutzarten durch Gehäuse (IP-Code). DIN Nr. 60529, 2014.
- [DIN-62061] DIN EN: Sicherheit von Maschinen. DIN Nr. 62061, 2016.
- [DIN-62264-1] DIN EN: Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen. DIN Nr. 62264-1, 2014.
- [Don-2002] Dong, Q.: Predicting and managing system interactions at early phase of the product development process. Massachusetts Institute of Technology, 2002.
- [Eas-2020a] EasyMile: EasyMile's Autonomous Tow-Tractor Leads Industry with IFOY AWARD Win, Toulouse, 2020.
- [Eas-2020b] EasyMile: TractEasy. <https://www.easymile.com/vehicle-solutions/tracteasy>, Aufruf am 18.09.2020.
- [Eas-2021] EasyMile: World-first: autonomous towing solving airport's pain points. <https://easymile.com/success-stories/tokyo-narita-airport>, Aufruf am 15.03.2021.
- [EG-89] EU-Richtlinien: Richtlinie 89/654/EWG des Rates über Mindestvorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz in Arbeitsstätten. EG-RL Nr. 89/654/EWG, 2007.
- [Erm-2016] Ermschel, U.; Möbius, C.; Wengert, H.: Investition und Finanzierung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.

- [Far-2016] Farid, A. M.; Suh, N. P. (Hrsg.): Axiomatic design in large systems – Complex products, buildings and manufacturing systems. Springer, Cham, Switzerland, 2016.
- [Fel-2018] Fellan, A.; Schellenberger, C.; Zimmermann, M.; Schotten, H. D.: Enabling Communication Technologies for Automated Unmanned Vehicles in Industry 4.0 (2018), S. 171–176.
- [Fen-2020] Fend, L.; Hofmann, J.: Digitalisierung in Industrie-, Handels- und Dienstleistungsunternehmen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.
- [Fer-2014] Fersen, O. v. (Hrsg.): Ein Jahrhundert Automobiltechnik – Nutzfahrzeuge. Springer Berlin, Berlin, 2014.
- [Fer-2020] Fernride GmbH: Fernrides Teleoperations-Lösung ermöglicht fahrerlose Logistik. <https://www.fernride.com/home-de>, Aufruf am 08.04.2021.
- [Flä-2015] Flämig, H.: Autonome Fahrzeuge und autonomes Fahren 18 im Bereich des Gütertransportes. In: Maurer, M., et al. (Hrsg.): Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte, 2015, S. 378–392.
- [Fle-2018] Fleischmann, A.; Oppl, S.; Schmidt, W.; Stary, C.: Ganzheitliche Digitalisierung von Prozessen – Perspektivenwechsel - Design Thinking - wertegeleitete Interaktion. Springer Vieweg, Wiesbaden, Germany, 2018.
- [Fli-2016] Fliedner, M.; Briskorn, D.; Boysen, N.: Vehicle scheduling under the warehouse-on-wheels policy. In: Discrete Applied Mathematics, Jg. 205 (2016), S. 52–61.
- [fml-2018] Wuddi, P.: Autonome Transporte auf Werksgeländen – Lösungsmöglichkeiten zur Absicherung von Bahnübergängen. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2018.
- [fml-2019a] Ben Jemia, O.: Technical Development of a Navigation System for an Omnidirectional Autonomous Mobile Platform Moving Semi-trailers as Part of Outdoor Logistics Automatization. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2019.

- [fml-2019b] Procher, J.: Auswahl und Bewertung technischer Bestandteile fahrerloser Transportsysteme in Bezug auf deren Outdoor-Tauglichkeit. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2019.
- [fml-2019c] Hammami, A.: Computer Vision for Indoor Inventory – Autonomous Flying Robot Using Deep Learning. Semesterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2019.
- [fml-2020a] Fichtner, A.-L.: Entwicklung eines unterstützenden Entscheidungsmodells für die Bewertung des Einsatzes autonomer Transportsysteme auf dem Werksgelände. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2020.
- [fml-2020b] Trujillo Saldaña, M. B.: Analysis of Transport Processes on the Factory Side of an Automotive Manufacturer for Implementing Autonomous Transport Systems using the Graphical Representation BPMN 2.0. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2020.
- [fml-2020c] Rau-Meiswinkel, S. J.: Technical Design Approach for Autonomous Mobile Robots – Analysis and Classification of Technological Components for Operation in an Outdoor Intralogistics Environment. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2020.
- [fml-2020d] Ben Jemia, O.: Design and Implementation of an Autonomous Navigation System for an Outdoor Autonomous Mobile Robot Moving Semi-trailers in an Industrial Environment. Masterarbeit. Lehrstuhl für Fördertechnik Materialfluss Logistik, Technische Universität München, Garching, 2020.
- [Foc-2018] Focke, M.; Steinbeck, J.: Steigerung der Anlagenproduktivität durch OEE-Management – Definitionen, Vorgehen und Methoden – von manuell bis Industrie 4.0. Springer Gabler, Wiesbaden, 2018.
- [Fot-2021] Fottner, J.; Clauer, D.; Hormes, F.; Freitag, M.; Beinke, T.; Overmeyer, L.; Gottwald, S. N.; Elbert, R.; Sarnow, T.; Schmidt, T.;

- Reith, K. B.; Zedek, H.; Thomas, F.: Autonomous Systems in Intralogistics – State of the Art and Future Research Challenges. Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V, 2021.
- [Fre-2014] Freund, J.; Rücker, B.: Praxishandbuch BPMN 2.0. Hanser, München, 2014.
- [Fun-2021] Functional Specs Inc.: Acclaro DFSS – Axiomatic Design. https://dfss-software.com/dfss_features_ad.asp, Aufruf am 01.02.2021.
- [Gad-2020] Gadatsch, A.: Grundkurs Geschäftsprozess-Management. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.
- [Gal-2020] Galin, R.; Meshcheryakov, R.; Kamesheva, S.; Samoshina, A.: Cobots and the benefits of their implementation in intelligent manufacturing. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Jg. 862 (2020), S. 32075.
- [Gar-2020] Gartner Inc.: Hype Cycle for Supply Chain Execution Technologies, 2020, 2020.
- [Ger-2018] Gerhardt, V.: Selbstbestimmung. Das Prinzip der Individualität – Reclams Universal-Bibliothek. Reclam Verlag, Ditzingen, 2018.
- [Ger-2019] Gerstenberger, M.: Preview of R15.08 Industrial Mobile Robot Safety. Vortrag. Autonomous Mobile Robot Conference, 2019.
- [Gha-2019] Ghaffarzadeh, K.; Jiao, N.: Mobile Robots, Autonomous Vehicles, and Drones in Logistics, Warehousing, and Delivery 2020-2040, 2019.
- [Gol-2011] Goll, J.: Methoden und Architekturen der Softwaretechnik. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 2011.
- [Gol-2015] Goll, J.; Hommel, D.: Mit Scrum zum gewünschten System. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015.
- [Göt-2014] Götze, U.: Investitionsrechnung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2014.
- [Gro-2016] Gronau, N.: Geschäftsprozessmanagement in Wirtschaft und Verwaltung – Analyse, Modellierung und Konzeption. GITO mbH Verlag, Berlin, 2016.

- [Grü-2019] Gründerszene Lexikon: Rapid-Prototyping – Begriff. Was ist Rapid-Prototyping? <https://www.gruenderszene.de/lexikon/begriffe/rapid-prototyping>, Aufruf am 29.10.2020.
- [Gün-2010] Günthner, W.; Hompel, M. ten: Internet der Dinge in der Intralogistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [Haf-2005] Haffner, A.: Ein Modell zur Bestimmung der monetären Einsparungspotenziale bei der Durchführung einer Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA). Jost-Jetter, Heimsheim, 2005.
- [Hed-2016] Hedderich, J.; Sachs, L.: Angewandte Statistik. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Hen-2015] Henley, R.: Using Functional Metrics to Facilitate Designing Collectively Exhaustive Mutually Exclusive Systems in the Context of Managing Return on Investment. In: Procedia CIRP, Jg. 34 (2015), S. 31–36.
- [Hen-2016] Henley, R.; Brown, C. A.: Axiomatic Design Applied to Play Calling in American Football. In: Procedia CIRP, Jg. 53 (2016), S. 206–212.
- [Her-2012] Hertzberg, J.; Lingemann, K.; Nüchter, A.: Mobile Roboter. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [Hes-2008] Hesse, W.; Mayr, H. C.: Modellierung in der Softwaretechnik: eine Bestandsaufnahme. In: Informatik-Spektrum, Jg. 31 (2008) Nr. 5, S. 377–393.
- [Hes-2021] Hesse, K.: Schluss mit Zukunft: Staplerantrieb mit Wasserstoff. <https://blog.toyota-forklifts.de/staplerantrieb-mit-wasserstoff>, Aufruf am 30.06.2021.
- [Hof-2018] Hofmann, M.: Vorgehensmodell. <https://www.gabler-banklexikon.de/definition/vorgehensmodell-70797>, Aufruf am 26.10.2020.
- [Höh-2008] Höhn, R.; Höppner, S.; Rausch, A.: Das V-Modell XT – Anwendungen, Werkzeuge, Standards. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [Hro-2014] Hromkovič, J.: Theoretische Informatik – Formale Sprachen, Berechenbarkeit, Komplexitätstheorie, Algorithmik, Kommunikation und Kryptographie. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.

- [Hua-2005] Huang, H.-M.; Pavek, K.; Novak, B.; Albusi, J.; Messinai, E.: A Framework for Autonomy Levels for Unmanned Systems (ALFUS). In: Association for Unmanned Vehicle Systems International (Hrsg.): AUVSI's unmanned systems North America 2005, Arlington, Va., 2005, S. 849–863.
- [Hus-2019] Hussain, R.; Zeadally, S.: Autonomous Cars: Research Results, Issues, and Future Challenges. In: IEEE Communications Surveys & Tutorials, Jg. 21 (2019) Nr. 2, S. 1275–1313.
- [IFR-2020] IFR International Federation of Robotics: World Robotics Report 2020, Frankfurt am Main, 2020.
- [Ihm-2006] Ihme, J.: Logistik im Automobilbau – Logistikkomponenten und Logistiksysteme im Fahrzeugbau; Tabellen. Hanser, München, Wien, 2006.
- [Inn-2018] Inninger, W.; Schellert, M.; Schulz, H.: FAT-Schriftenreihe 312 – Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr. Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, IML, 2018.
- [INS-2019] Inside Unmanned Systems: Autonomous Towing Tractors Being Tested at Narita International Airport Corporation (NAA). <https://insideunmannedsystems.com/autonomous-towing-tractors-being-tested-at-narita-international-airport-corporation-naa/>, Aufruf am 02.03.2021.
- [ISO-12100] DIN EN ISO: Sicherheit von Maschinen. ISO Nr. 12100:2011-03, 2011.
- [ISO-13849-1] DIN EN ISO: Sicherheit von Maschinen. ISO Nr. 13849-1, 2016.
- [ISO-14001] DIN EN ISO: Umweltmanagementsysteme. ISO Nr. 14001:2015-11, 2015.
- [ISO-19510] ISO Internationale Organisation für Normung: Informationstechnik. ISO Nr. 19510:2013, 2013.
- [ISO-20653] ISO: Straßenfahrzeuge - Schutzarten (IP-Code) - Schutz gegen fremde Objekte, Wasser und Kontakt - Elektrische Ausrüstungen. ISO Nr. 20653, 2013.

- [ISO-26262-1] ISO: Straßenfahrzeuge - Funktionale Sicherheit. ISO Nr. 26262, 2018.
- [ISO-9001] DIN EN ISO: Qualitätsmanagementsysteme. ISO Nr. 9001:2015-11, 2015.
- [Jo-2014] Jo, K.; Kim, J.; Kim, D.; Jang, C.; Sunwoo, M.: Development of Autonomous Car—Part I: Distributed System Architecture and Development Process. In: IEEE Transactions on Industrial Electronics, Jg. 61 (2014) Nr. 12, S. 7131–7140.
- [Jün-1989] Jünemann, R.; Pfohl, H.-C.; Jünemann, R.: Materialfluß und Logistik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1989.
- [Jun-2020] Junge, A.: 3D-Kamerasystem löst herkömmliche Sicherheitssensoren ab – tofguard: Mehr Sicherheit für Mensch und Maschine, 2020.
- [Kan-2014] Kant, I.; Weischedel, W.: Die Metaphysik der Sitten. Suhrkamp, Frankfurt am Main, 2014.
- [Kas-2015] Kassel, D.: Künstliche Intelligenz – Mensch ist durch Kreativität überlegen. https://www.deutschlandfunkkultur.de/kuenstliche-intelligenz-mensch-ist-durch-kreativitaet.1008.de.html?dram:article_id=308840, Aufruf am 14.12.2020.
- [Kau-2021] Kaulfuhs-Berger, J.; Schmidt, T.: "Mehr Fragen als Antworten". <https://www.technische-logistik.net/%E2%80%9Emehr-fragen-als-antworten%E2%80%9C>, Aufruf am 26.02.2021.
- [Kee-2004] Keeney, R. L.: Stimulating Creative Design Alternatives Using Customer Values. In: IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), Jg. 34 (2004) Nr. 4, S. 450–459.
- [Kho-2012] Khoshelham, K.; Elberink, S. O.: Accuracy and resolution of Kinect depth data for indoor mapping applications. In: Sensors (Basel, Switzerland), Jg. 12 (2012) Nr. 2, S. 1437–1454.
- [Kli-2007] Klindt, T. (Hrsg.): Die neue EG-Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Beuth, Berlin, 2007.
- [Klu-2018] Klug, F.: Logistikmanagement in der Automobilindustrie – Grundlagen der Logistik Im Automobilbau. Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2018.

- [Kne-1998] Kneuper, R.; Müller-Luschnat, G.; Oberweis, A.: Vorgehensmodelle für die betriebliche Anwendungsentwicklung. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1998.
- [Kne-2021] Knebl, H.: Gewichtete Graphen. In: Knebl, H. (Hrsg.): Algorithmen und Datenstrukturen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2021, S. 253–318.
- [Kno-2018] Knorr, C.: Pugh-Matrix. <https://www.projektmagazin.de/methoden/pugh-matrix>, Aufruf am 10.11.2020.
- [Kol-2008] Kolberg, E.; Reich, Y.; Levin, I.: Design of Design Methodology for Autonomous Robots. In: Visser, U., et al. (Hrsg.): RoboCup 2007: Robot Soccer World Cup XI. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008, S. 528–539.
- [Kör-2019] Körner, M.-F.; Bauer, D.; Keller, R.; Rösch, M.; Schlereth, A.; Simon, P.; Bauernhansl, T.; Fridgen, G.; Reinhart, G.: Extending the Automation Pyramid for Industrial Demand Response. In: Procedia CIRP, Jg. 81 (2019), S. 998–1003.
- [Kor-2020] Korte, D.: Sicherheitsbezogenes Sensorsystem für fahrerlose Transportfahrzeuge, 2020.
- [Kos-2014] Kossak, F.; Illibauer, C.; Geist, V.; Kubovy, J.; Natschläger, C.; Ziebermayr, T.; Kopetzky, T.; Freudenthaler, B.; Schewe, K.-D.: Introduction. In: Kossak, F., et al. (Hrsg.): A Rigorous Semantics for BPMN 2.0 Process Diagrams. Springer International Publishing, Cham, 2014, S. 1–8.
- [Kos-2017] Koseoglu, M.; Celik, O. M.; Pektas, O.: Design of an autonomous mobile robot based on ROS2017 International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP), S. 1–5.
- [Kra-2018] Krause, D.; Gebhardt, N.: Methodische Entwicklung modularer Produktfamilien. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2018.
- [Kra-2020] Kramer, H.: Teleoperation – Or: The key to making autonomous vehicles truly driverless. Vortrag. VDV - Die Verkehrsunternehmen, 03.09.2020.

- [Kra-2022] Kramer-Schwenk, I.: Mikroprogrammierung. <http://www.techniklexikon.net/d/mikroprogrammierung/mikroprogrammierung.htm>, Aufruf am 05.05.2022.
- [Kri-2020] Kriwall, M.: Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA), 2020.
- [Kuh-2013] Kuhrmann, M.: Agile Vorgehensmodelle. <https://www.enzyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de/wi-enzyklopaedie/lexikon/is-management/Systementwicklung/Vorgehensmodell/Agile-Vorgehensmodelle>, Aufruf am 29.10.2020.
- [Lab-2010] Labun, E.: Geschäftsprozessmanagement: Einführung in »Business Process Modelling Notation« (BPMN). Fachhochschule Gießen-Friedberg, Institut für Softwarearchitektur, 2010.
- [Lam-2012] Lambe, A. B.; Martins, J. R. R. A.: Extensions to the design structure matrix for the description of multidisciplinary design, analysis, and optimization processes. In: Structural and Multidisciplinary Optimization, Jg. 46 (2012) Nr. 2, S. 273–284.
- [Lan-1977] Lano, R.: The N2 chart. In: Information Report, TRW (1977).
- [Län-2020] Länderausschuss für Arbeitsschutz und Sicherheitstechnik (LASI): Leitlinien zur Betriebssicherheitsverordnung - Häufig gestellte Fragen und Antworten – LV 35, 2020.
- [Le-2006] Le-Anh, T.; Koster, M.B.M. de: A review of design and control of automated guided vehicle systems. In: European Journal of Operational Research, Jg. 171 (2006) Nr. 1, S. 1–23.
- [Lee-2006] Lee, D. G.; Suh, N. P.: Axiomatic design and fabrication of composite structures – Applications in robots, machine tools, and automobiles. Oxford University Press, New York, 2006.
- [Lei-2015] Leimeister, J. M.: Einführung in die Wirtschaftsinformatik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2015.
- [Lin-2020] Linz, T.: Testing Autonomous Systems. In: Goericke, S. (Hrsg.): The Future of Software Quality Assurance. Springer International Publishing, Cham, 2020, S. 61–75.
- [Liu-2018] Liu, H.-C.; You, X.-Y.; Tsung, F.; Ji, P.: An improved approach for failure mode and effect analysis involving large group of experts: An

application to the healthcare field. In: *Quality Engineering*, Jg. 30 (2018) Nr. 4, S. 762–775.

- [Lop-2002] Lopez de Ipina, D.; Mendonça, P. R. S.; Hopper, A.: TRIP: A Low-Cost Vision-Based Location System for Ubiquitous Computing. In: *Personal and Ubiquitous Computing*, Jg. 6 (2002) Nr. 3, S. 206–219.
- [Lüt-2017] Lüttel, T.; Ebert, F.; Faßbender, D.; Fries, C.; Heinrich, B. C.; Jaspers, H.; Kallwies, J.; Naujoks, B.; Wünsche, H.-J.: Assistenz- und Autonomiefunktionen zur Entlastung des Fahrers in Offroad-Szenarien. In: *at - Automatisierungstechnik*, Jg. 65 (2017) Nr. 7
- [Lyc-2019] Lyczkowski, E.; Wanjek, A.; Sauer, C.; Kiess, W.: *Wireless Communication in Industrial Applications Proceedings, 2019 24th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*. IEEE, Piscataway, NJ, 2019, S. 1392–1395.
- [Mai-2014] Maind, S. B.; Wankar, p.: Research Paper on Basic of Artificial Neural Network. In: Xiong, N. N. (Hrsg.): *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*. Research Department, Auricle Technologies Pvt. Ltd., India, India, 2014, S. 96–100.
- [Mar-2014] Martin, H.: *Transport- und Lagerlogistik – Planung, Struktur, Steuerung und Kosten von Systemen der Intralogistik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [Mas-2012] Maske, P.: *Mobile Applikationen 2*. Gabler Verlag, Wiesbaden, 2012.
- [Mau-2001] Maurer, A.; Stark, W. A.: *Steering Carmaking into 21st Century – From today's best practices to the transformed plants of 2020*. The Boston Consulting Group, 2001.
- [Mau-2015] Maurer, M.; Gerdes, J. C.; Lenz, B.; Winner, H. (Hrsg.): *Autonomes Fahren: Technische, rechtliche und gesellschaftliche Aspekte*, 2015.
- [Mau-2018] Maulana, I.; Rusdinar, A.; Priramadhi, R. A.: Lidar Application for Mapping and Robot Navigation on Closed Environment. In: *Journal of Measurements, Electronics, Communications, and Systems*, Jg. 4 (2018) Nr. 1, S. 20.

- [Mee-2006] Meerkamm, H. (Hrsg.): Design for X – Beiträge zum 17. Symposium, Neukirchen, 12. und 13. Oktober 2006. Univ. Erlangen-Nürnberg Lehrstuhl Konstruktionstechnik, Erlangen, 2006.
- [Mel-2004] Melnyk, S. A.; Stewart, D. M.; Swink, M.: Metrics and performance measurement in operations management: dealing with the metrics maze. In: Journal of Operations Management, Jg. 22 (2004) Nr. 3, S. 209–218.
- [Min-2014] Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg: Wassergesetz für Baden-Württemberg – WG, 2014.
- [Mor-2007] Morales, Y.; Tsubouchi, T.: DGPS, RTK-GPS and StarFire DGPS Performance Under Tree Shading Environments. IEEE International Conference on Integration Technology, 2007, S. 519–524.
- [Nüc-2006] Nüchter, A.: Semantische dreidimensionale Karten für autonome mobile Roboter. Zugl.: Bonn, Univ., Diss., Berlin, 2006.
- [Now-2017] Now-GmbH.de: FFZ70 – Einsatz von 70 wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen innerhalb des BMW Werks Leipzig. Now-GmbH.de Nr. 03B10802, 2017.
- [Obe-2014] Obermeier, S.; Fischer, H.; Fleischmann, A.; Dirndorfer, M.: Geschäftsprozesse realisieren – Ein praxisorientierter Leitfaden von der Strategie bis zur Implementierung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014.
- [Oye-2020] Oyekanlu, E. A.; Smith, A. C.; Thomas, W. P.; Mulroy, G.; Hitesh, D.; Ramsey, M.; Kuhn, D. J.; Mcghinnis, J. D.; Buonavita, S. C.; Looper, N. A.; Ng, M.; Ng'oma, A.; Liu, W.; McBride, P. G.; Shultz, M. G.; Cerasi, C.; Sun, D.: A Review of Recent Advances in Automated Guided Vehicle Technologies: Integration Challenges and Research Areas for 5G-Based Smart Manufacturing Applications. In: IEEE Access, Jg. 8 (2020), S. 202312–202353.
- [Pad-2016] Paden, B.; Cap, M.; Yong, S. Z.; Yershov, D.; Frazzoli, E.: A Survey of Motion Planning and Control Techniques for Self-Driving Urban Vehicles. In: IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Jg. 1 (2016) Nr. 1, S. 33–55.

- [Pah-2007] Pahl, G.; Beitz, W.; Blessing, L.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.; Wallace, K.: Engineering Design – A Systematic Approach. Springer-Verlag London Limited, London, 2007.
- [Paw-2014] Pawellek, G.: Ganzheitliche Fabrikplanung – Grundlagen, Vorgehensweise, EDV-Unterstützung. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Pha-2020] Phantom Auto: Drivers can work remotely now, too – Transforming logistics, mobility, and automation with human-centered remote operation. <https://phantom.auto/>, Aufruf am 08.04.2021.
- [Phi-2007] Philipp, T.; Böse, F.; Windt, K.: Autonomously Controlled Processes - Characterisation of Complex Production Networks. In: Cunha, P. F.; Maropoulos, P. G. (Hrsg.): Digital Enterprise Technology. Springer Science+Business Media LLC, Boston, MA, 2007.
- [Pon-2008] Ponn, J.; Lindemann, U.: Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [PSA-2018] PSA: PSA-Gruppe und EasyMile experimentieren mit autonomem Traktor in Sochaux, 2018.
- [Pug-1991] Pugh, S.: Total design – Integrated methods for successful product engineering. Addison-Wesley, Wokingham, England, 1991.
- [Rau-2013] Rauch, E.: Konzept eines wandlungsfähigen und modularen Produktionssystems für Franchising-Modelle. Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, 2013.
- [Reb-2012] Rebovich, G.; DeRosa, J. K.: Patterns of Success in Systems Engineering of IT-Intensive Government Systems. In: Procedia Computer Science, Jg. 8 (2012), S. 303–308.
- [Rot-2016] Roth, A. (Hrsg.): Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0 – Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Roy-1987] Royce, W. W.: Managing the Development of Large Software Systems: Concepts and Techniques Proceedings of the 9th international conference on Software Engineering. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 1987, S. 328–338.

- [Ryc-2020] Ryck, M. de; Versteyhe, M.; Debrouwere, F.: Automated guided vehicle systems, state-of-the-art control algorithms and techniques. In: Journal of Manufacturing Systems, Jg. 54 (2020), S. 152–173.
- [Sab-2013] Sabattini, L.; Digani, V.; Secchi, C.; Cotena, G.; Ronzoni, D.; Foppoli, M.; Oleari, F.: echnological roaDesign Matrixap to boost the introduction of AGVs in industrial applications, 2013 13th International Conference on Autonomous Robot Systems, S. 203–208.
- [SAE-J3016] SAE international: Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems. SAE Nr. J3016, 2014.
- [Sch-1995] Scheer, A.-W.: Wirtschaftsinformatik. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1995.
- [Sch-1998] Scheer, A.-W.: ARIS - Modellierungsmethoden, Metamodelle, Anwendungen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1998.
- [Sch-2004] Schwaber, K.: Agile project management with Scrum. Microsoft Press, ReDesign Matrixond, Wash., 2004.
- [Sch-2010] Schatten, A.; Biffel, S.; Demolsky, M.; Gostischa-Franta, E.; Östreicher, T.; Winkler, D.: Best Practice Software-Engineering – Eine praxiserprobte Zusammenstellung von komponentenorientierten Konzepten, Methoden und Werkzeugen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Neckar, 2010.
- [Sch-2013] Schwarz, C.; Schachmanow, J.; Sauer, J.; Overmeyer, L.; Ullmann, G.: Selbstgesteuerte Fahrerlose Transportsysteme, 2013.
- [Sch-2014a] Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb – Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. Springer Vieweg, Berlin, 2014.
- [Sch-2014b] Schlink, H.: Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2014.
- [Sch-2018a] Schuhmacher, J.; Hummel, V.: Development of a descriptive model for intralogistics as a foundation for an autonomous control method for intralogistics systems. In: Procedia Manufacturing, Jg. 23 (2018), S. 225–230.

- [Sch-2018b] Schüttler, T.: Relativistische Effekte bei der Satellitennavigation. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- [Sch-2020] Schneider, S.; Duwe, R.: Teleoperation – ein Schritt Richtung Autonomie, 2020.
- [Sch-2021] Schunke, M.; Lewandrowski, M.; Fähnle, A.: Mit Tempo zum automatisierten Fahren – Wie teleoperation eine frühere Markteinführung begünstigen kann, 2021.
- [Sha-2018] Sharma, A.: The Mobile Robot Market in 2022 – Our Predictions. <https://www.interactanalysis.com/the-mobile-robot-market-in-2022-our-predictions/>, Aufruf am 25.02.2021.
- [Sic-2009] Siciliano, B.; Khatib, O.; Groen, F.; Buehler, M.; Iagnemma, K.; Singh, S.: The DARPA Urban Challenge. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2009.
- [Sie-2011] Siegwart, R.; Nourbakhsh, I. R.; Scaramuzza, D.: Introduction to autonomous mobile robots. MIT Press, Cambridge, Mass., 2011.
- [Sim-1977] Simon, H. A.: The new science of management decision. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1977.
- [Sim-2019] Simoens, P.: Industry 5.0: where smart robotics meets human creativity. <https://www.imec-int.com/en/imec-magazine/imec-magazine-january-2019/man-and-machine-collaborating-on-the-factory-floor-a-nightmare-or-a-match-made-in-heaven>, Aufruf am 07.09.2020.
- [Sin-2017] Singhal, A.; Kejriwal, N.; Pallav, P.; Choudhury, S.; Sinha, R.; Kumar, S.: Managing a Fleet of Autonomous Mobile Robots (AMR) using Cloud Robotics Platform, 2017.
- [Sta-2006] Staud, J. L.: Geschäftsprozessanalyse – Ereignisgesteuerte Prozessketten und objektorientierte Geschäftsprozessmodellierung für Betriebswirtschaftliche Standardsoftware (German Edition). Springer, Dordrecht, 2006.
- [Ste-1981] Steward, D. V.: The design structure system: A method for managing the design of complex systems. In: IEEE Transactions on Engineering Management, Jg. EM-28 (1981) Nr. 3, S. 71–74.

- [Suh-1978] Suh, N. P.; Bell, A. C.; Gossard, D. C.: On an Axiomatic Approach to Manufacturing and Manufacturing Systems. In: Journal of Engineering for Industry, Jg. 100 (1978) Nr. 2, S. 127–130.
- [Suh-1998] Suh, N. P.: Axiomatic Design Theory for Systems. In: Research in Engineering Design, Jg. 10 (1998) Nr. 4, S. 189–209.
- [Suh-2001] Suh, N. P.: Axiomatic design – Advances and applications. Oxford Univ. Press, New York, NY, 2001.
- [Suh-2005] Suh, N. P.: Complexity – Theory and applications. Oxford University Press, Oxford, 2005.
- [Sul-1986] Sullivan, L. P.: Quality Function Deployment. In: Quality Progress (ASQC) (1986), S. 39–50.
- [Sun-2019] Sunder M., V.; L.S., G.; Marathe, R. R.: Dynamic capabilities. In: European Business Review, Jg. 31 (2019) Nr. 1, S. 25–63.
- [Szé-2012] Szélig, N.; Vajna, S.; Schabacker, M.: Modellierungsmethoden für die Prozessplanung. In: Entwickeln – Entwerfen – Erleben. Methoden und Werkzeuge in der Produktentwicklung 10. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik (KT2012) (2012).
- [Tat-1999] Tate, D.: A roadmap for decomposition: activities, theories, and tools for system design. Massachusetts Institute of Technology, 1999.
- [Tho-2009] Thompson, M. K.: Teaching Axiomatic Design in the freshman year: a case study at kaist. In: Gonçalves-Coelho, A. M. (Hrsg.): Proceedings of the fifth International Conference on Axiomatic Design. Institute of Axiomatic Design, [Place of publication not identified], 2009, S. 147–154.
- [Tho-2013] Thompson, M. K.: A Classification of Procedural Errors in the Definition of Functional Requirements in Axiomatic Design Theory. In: Thompson, M. K. (Hrsg.): Proceedings of the 7th International Conference on Axiomatic Design, Worcester, Massachusetts, USA, 2013, S. 107–113.
- [Tho-2020] Thommen, J.-P.; Achleitner, A.-K.; Gilbert, D. U.; Hachmeister, D.; Jarchow, S.; Kaiser, G.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2020.

- [Thr-2006] Thrun, S.; Burgard, W.; Fox, D.: Probabilistic robotics. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 2006.
- [Thr-2010] Thrun, S.: Toward robotic cars. In: Communications of the ACM, Jg. 53 (2010) Nr. 4, S. 99–106.
- [TLD-2022] TLD Group: TLD Technologies TractEasy. <https://www.tld-group.com/technologies/tracteasy/>, Aufruf am 19.06.2022.
- [Tob-2012] Toben, T.; Eilers, S.; Kuka, C.; Schweigert, S.; Winkelmann, H.; Ruehrup, S.: Safe Autonomous Transport Vehicles in Heterogeneous Outdoor Environments. In: Hähnle, R., et al. (Hrsg.): Leveraging Applications of Formal Methods, Verification, and Validation. Springer, Berlin, Heidelberg, 2012, S. 61–75.
- [tof-2020] tofmotion: tofguard.
https://drive.google.com/file/d/1BcZYWw_I1MqX9YYzJxtATMoZJDZ-2VSn/view, Aufruf am 23.09.2020.
- [Tom-2009] Tomiyama, T.; Gu, P.; Jin, Y.; Lutters, D.; Kind, C.; Kimura, F.: Design methodologies: Industrial and educational applications. In: CIRP Annals, Jg. 58 (2009) Nr. 2, S. 543–565.
- [Tre-2019] Trenkle, A.: Entwurfsmuster für Fahrerlose Transportsysteme, 2019.
- [Ull-2011] Ullrich, G.: Epochale FTS-Entwicklung. Vortrag. Verein Deutscher Ingenieure, München, 14.04.2011.
- [Ull-2017] Ullrich, G.: Technikvergleich zwischen FTS und autonomen PKW – Die Bedeutung von Automatisierung. Vortrag. Materialflusskongress, Garching, 06.04.2017.
- [Ull-2019] Ullrich, G.; Albrecht, T.: Fahrerlose Transportsysteme – Eine Fibel - mit Praxisanwendungen - zur Technik - für die Planung. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH; Springer Vieweg, Wiesbaden, 2019.
- [Und-2021] Underwriters Laboratories (UL): Certification. <https://www.ul.com/services/certification>, Aufruf am 20.05.2022.
- [Ung-2018] Unger, H.; Markert, T.; Müller, E.: Evaluation of use cases of autonomous mobile robots in factory environments. In: Procedia Manufacturing, Jg. 17 (2018), S. 254–261.

- [Uni-2018] Union of Concerned Scientists: Self-Driving Cars Explained – How do self-driving cars work - and what do they mean for the future?, 2018.
- [VDA-5050] Verband der Automobilindustrie e.V: Schnittstelle zur Kommunikation zwischen Fahrerlosen Transportfahrzeugen (FTF) und einer Leitsteuerung. VDA Nr. 5050, 2019.
- [VDI-2206] Verein Deutscher Ingenieure: Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme. VDI Nr. 2206, 2004.
- [VDI-2510] Verein Deutscher Ingenieure: Fahrerlose Transportsysteme (FTS). VDI Nr. 2510, 2005.
- [VDI-2510-1] Verein Deutscher Ingenieure: Infrastruktur und periphere Einrichtungen für Fahrerlose Transportsysteme (FTS). VDI Nr. 2510-1, 2009.
- [VDI-2510-2] Verein Deutscher Ingenieure: Fahrerlose Transportsysteme (FTS) - Sicherheit von FTS. VDI Nr. 2510-2, 2013.
- [VDI-2710-4] Verein Deutscher Ingenieure: Analyse der Wirtschaftlichkeit Fahrerloser Transportsysteme (FTS). VDI Nr. 2710-4, 2011.
- [VDI-4451-2] Verein Deutscher Ingenieure: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) Energieversorgung und Ladetechnik. VDI Nr. 4451-2, 2000.
- [VDI-4451-6] Verein Deutscher Ingenieure: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) Sensorik für Navigation und Steuerung. VDI Nr. 4451-6, 2003.
- [VDI-4451-7] Verein Deutscher Ingenieure: Kompatibilität von Fahrerlosen Transportsystemen (FTS) Leitsteuerung für FTS. VDI Nr. 4451-7, 2005.
- [Ver-2002] Versteegen, G.: Vorgehensmodelle. In: Versteegen, G. (Hrsg.): Software Management. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2002, S. 29–61.
- [Ver-2007] Version One: 1st Annual State of Agile Report, 2007.
- [Vog-2017] Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten: Handbuch Industrie 4.0 Bd.3. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2017.

- [Wag-2021] Wagner, M.: FFZ70 – Einsatz von 70 wasserstoffbetriebenen Flurförderzeugen innerhalb des BMW-Werks Leipzig.
<https://www.mec.ed.tum.de/fml/forschung/2021/ffz70-einsatz-von-70-wasserstoffbetriebenen-flurfoerderzeugen-innerhalb-des-bmw-werks-leipzig/>, Aufruf am 08.03.2021.
- [Web-2016] Weber, K. H.: Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2016.
- [Weh-2020] Wehking, K.-H.: Technisches Handbuch Logistik 1. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [Whi-2004] White, S. A.: Introduction to BPMN.
<https://www.bptrends.com/bpt/wp-content/publicationfiles/07-04%20WP%20Intro%20to%20BPMN%20-%20White.pdf>, Aufruf am 11.11.2020.
- [Wie-2007] Wieczorrek, H. W.; Mertens, P.: Management von IT-Projekten – Von der Planung zur Realisierung. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [Wil-2020] Willke, H.: Zur Rationalität der Intuition. In: Organisationsberatung, Supervision, Coaching, Jg. 27 (2020) Nr. 4, S. 551–563.
- [Xu-2020] Xu, Z.; Zhao, A.; Zhai, B.; Wang, A.; Zhang, L.: Comparative Studies of Robot Navigation. In: Liu, Y., et al. (Hrsg.): Advances in Natural Computation, Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. Springer International Publishing, Cham, 2020, S. 301–310.
- [Yas-2004] Yassine, A. A.: An Introduction to Modeling and Analyzing Complex Product Development Processes Using the Design Structure Matrix (DSM) Method (2004), S. 1–17.
- [Zhe-2019] Zheng, C.; Zhang, Y.; Li, J.; Bai, J.; Qin, X.; Eynard, B.: Survey on Design Approaches for Robotic Manufacturing Systems in SMEs. In: Procedia CIRP, Jg. 84 (2019), S. 16–21.

Durch die Autorin betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der durch diese Forschungsarbeit aufgegriffenen Untersuchungsfelder wurden nachfolgende Studienarbeiten erstellt. Die Anfertigung der Arbeiten wurde durch die Autorin wissenschaftlich und inhaltlich angeleitet.

Kurzbeleg	Titel	Autor/in	Art	Abgabe
[fml-2018]	Autonome Transporte auf Werksgeländen – Lösungsmöglichkeiten zur Absicherung von Bahnübergängen	Wuddi, Philipp	MA	2018/10
[fml-2019a]	Technical Development of a Navigation System for an Omnidirectional Autonomous Mobile Platform Moving Semi-trailers as Part of Outdoor Logistics Automatization	Ben Jemia, Omar	SA	2019/04
[fml-2019b]	Auswahl und Bewertung technischer Bestandteile fahrerloser Transportsysteme in Bezug auf deren Outdoor-Tauglichkeit	Procher, Jakob	SA	2019/10
[fml-2019c]	Computer Vision for Indoor Inventory – Autonomous Flying Robot Using Deep Learning	Hammami, Ala	SA	2019/10
[fml-2020a]	Entwicklung eines unterstützenden Entscheidungsmodells für die Bewertung des Einsatzes autonomer Transportsysteme auf dem Werksgelände	Fichtner, Anna-Lena	MA	2020/04
[fml-2020b]	Analysis of Transport Processes on the Factory Side of an Automotive Manufacturer for Implementing Autonomous Transport Systems using the Graphical Representation BPMN 2.0	Trujillo Saldaña, Mayra Beatriz	MA	2020/07
[fml-2020c]	Technical Design Approach for Autonomous Mobile Robots – Analysis and Classification of Technological Components for Operation in an Outdoor Intralogistics Environment	Rau-Meiswinkel, Svenja Johanna	MA	2020/10
[fml-2020d]	Design and Implementation of an Autonomous Navigation System for an Outdoor Autonomous Mobile Robot Moving Semi-trailers in an Industrial Environment	Ben Jemia, Omar	MA	2020/10

Abbildungsverzeichnis

Hauptteil

Abbildung 1-1: Jährliche Installationen von Industrierobotern nach Kundenindustrien weltweit (in 1.000 Einheiten) [IFR-2020, S. 14]	2
Abbildung 1-2: Aufbau der Arbeit	6
Abbildung 2-1: Illustration verschiedener FTS a) [Ull-2019, S. 3] Bildquelle: Barrett-Cravens/ Savant Automation, 1958 b) [BMW-2018] Bildquelle: BMW Group, 2018 c) [DB-2020] Bildquelle: DB Schenker, 2020 d) [BMW-2019] Bildquelle: BMW Group, 2019	11
Abbildung 2-2: Einordnung von Navigationstechnologien für FTF	16
Abbildung 2-3: Grobe Einordnung der Begrifflichkeiten AMR und FTS anhand der Navigationstechnologie [Ger-2019, S. 16]	26
Abbildung 2-4: Differenzierung von AMRs und FTS sowie Indoor- und Outdoor-Anwendungen	29
Abbildung 2-5: Abgeleitete Autonomiestufen für intralogistische Systeme [Fot-2021, S. 4f.]	31
Abbildung 2-6: Auflösung der konventionellen Automatisierungspyramide hin zur autonomen Intralogistik [Fot-2021, S. 3]	32
Abbildung 2-7: Die vier Domänen des Axiomatic Designs in Anlehnung an Suh [Lee-2006, S.454]	43
Abbildung 2-8: BPMN-Basiselemente in Anlehnung an Freund et al. [Fre-2014]	50
Abbildung 2-9: EPK-Grundelemente in Anlehnung an Scheer et al. [Sch-1995]	51
Abbildung 2-10: Vorgehen nach dem V-Modell XT für die Entwicklung des Vorgehensmodells	58
Abbildung 3-1: Vorgehensweise der Ist-Analyse	62
Abbildung 3-2: Typische Formen eines Automobilwerks [Mau-2001, S. 11]	63
Abbildung 3-3: Layout des BMW-Werks München mit den gekennzeichneten Fertigungsbereichen	64
Abbildung 3-4: Innerbetriebliche Transportprozesse im Outdoor-Bereich auf dem Werksgelände eines Automobilherstellers	65
Abbildung 3-5: Identifizierte Outdoor-Transportprozesse im BMW-Werk München	67
Abbildung 3-6: BPMN Diagramm – a) Direktanlieferung Presswerk	69

Abbildung 3-7: SWOT-Analyse – a) Direktanlieferung Presswerk	73
Abbildung 3-8: Referenzprozessbausteine von Outdoor-Transportprozessen auf dem Werksgelände	76
Abbildung 3-9: Referenzprozessbausteine für den Einsatz von AMR aufgeteilt nach den Verantwortlichkeiten	82
Abbildung 4-1: Mapping- und Zig-Zagging-Prozess [Suh-2001]	86
Abbildung 4-2: Methodisches Vorgehen zur Ableitung der Gestaltungsrichtlinien mithilfe von Axiomatic Design und FMs	95
Abbildung 4-3: Grafische Darstellung des FR-DP-Baums der obersten Ebene	97
Abbildung 4-4: Ausschnitt aus Acclaro DFSS zur Erstellung und Überprüfung der Gesamt-Design Matrix	126
Abbildung 4-5: Gestaltungsrichtlinien für die Implementierung von AMRs auf dem Werksgelände	130
Abbildung 5-1: TractEasy von EasyMile [Eas-2020b]	135
Abbildung 5-2: Layout des BMW-Werks Dingolfing mit dem Anwendungsfall und den Fahrrouten des zu automatisierenden Versorgungsprozesses	137
Abbildung 5-3: Automobilkarosserie mit rot gekennzeichneten PHS-Bauteilen [Wan-2017, S. 6]	139
Abbildung 5-4: Elektroschlepper P250 mit Planentrailern [Lin-2021] [Gey-2021]	139

Anhang A

Abbildung A-1: Entsorgung Presswerk – Stahl	A-1
Abbildung A-2: Entsorgung Presswerk – Aluminium	A-1
Abbildung A-3: Direktanlieferung Karosseriebau	A-2
Abbildung A-4: Versorgung Karosseriebau	A-3
Abbildung A-5: Direktanlieferung Lackiererei	A-4
Abbildung A-6: Direktanlieferung Sitzfertigung	A-5
Abbildung A-7: Direktanlieferung Montage	A-6
Abbildung A-8: Entsorgungsprozess Montage, Motorenbau und Sitzfertigung	A-7

Abbildung A-9:	Direktanlieferung Motorenbau	A-8
Abbildung A-10:	SWOT – Entsorgung Presswerk – Stahl	A-9
Abbildung A-11:	SWOT – Entsorgung Presswerk – Aluminium	A-9
Abbildung A-12:	SWOT – Direktanlieferung Karosseriebau	A-10
Abbildung A-13:	SWOT – Versorgung Karosseriebau	A-10
Abbildung A-14:	SWOT – Direktanlieferung Lackiererei	A-10
Abbildung A-15:	SWOT – Direktanlieferung Sitzfertigung	A-11
Abbildung A-16:	SWOT – Direktanlieferung Montage	A-11
Abbildung A-17:	SWOT – Entsorgungsprozess Montage, Motorenbau und Sitzfertigung	A-11
Abbildung A-18:	SWOT – Direktanlieferung Motorenbau	A-12

Anhang B

Abbildung B-1:	Übersicht FR-DP-Baumstruktur in der Software Acclaro DFSS mit Gestaltungsfeldern (grün: ungekoppelt, blau: entkoppelt, rot: gekoppelt)	B-5
Abbildung B-2:	FR ₁₁ -DP ₁₁ -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung	B-6
Abbildung B-3:	FR ₁₂ -DP ₁₂ -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung	B-6
Abbildung B-4:	FR ₁₃ -DP ₁₃ -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung	B-6
Abbildung B-5:	FR ₁₄ -DP ₁₄ -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung	B-7
Abbildung B-6:	FR ₁₅ -DP ₁₅ -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung	B-7
Abbildung B-7:	FR ₂₁ -DP ₂₁ -Baum Gestaltungsfeld – Technische Machbarkeit	B-8

Abbildung B-8:	FR ₂₂ -DP ₂₂ -Baum Gestaltungsfeld – Technische Machbarkeit	B-8
Abbildung B-9:	FR ₂₃ -DP ₂₃ -Baum Gestaltungsfeld – Technische Machbarkeit	B-9
Abbildung B-10:	FR ₃₁ -DP ₃₁ -Baum Gestaltungsfeld – Sicherheitsmanagement	B-9
Abbildung B-11:	FR ₃₂ -DP ₃₂ -Baum Gestaltungsfeld – Sicherheitsmanagement	B-10
Abbildung B-12:	FR ₃₃ -DP ₃₃ -Baum Gestaltungsfeld – Sicherheitsmanagement	B-10
Abbildung B-13:	FR ₄₁ -DP ₄₁ -Baum Gestaltungsfeld – Auftragsmanagement	B-11
Abbildung B-14:	FR ₄₂ -DP ₄₂ -Baum Gestaltungsfeld – Auftragsmanagement	B-11
Abbildung B-15:	FR ₅₁ -DP ₅₁ -Baum Gestaltungsfeld – Wirtschaftlichkeit	B-12
Abbildung B-16:	FR ₅₂ -DP ₅₂ -Baum Gestaltungsfeld – Wirtschaftlichkeit	B-12
Abbildung B-17:	FR ₅₃ -DP ₅₃ -Baum Gestaltungsfeld – Wirtschaftlichkeit	B-13
Abbildung B-18:	Übersicht der gesamten Design Matrix in Acclaro DFSS	B-14

Tabellenverzeichnis

Hauptteil

Tabelle 2-1:	Klassifizierungsmatrix intralogistischer Systeme [Fot-2021, S. 5]	34
Tabelle 2-2:	Gegenüberstellung und Bewertung phasenbezogener Vorgehensmodelle in Anlehnung an [Mas-2012]	40
Tabelle 2-3:	Gegenüberstellung und Bewertung von Designtheorien und -methoden	48
Tabelle 2-4:	Gegenüberstellung und Bewertung grafischer Modellierungssprachen [Obe-2014]	53
Tabelle 2-5:	Einordnung und Abgrenzung des Forschungsbedarfs	57
Tabelle 3-1:	Beurteilungsmatrix identifizierter Outdoor- Transportprozesse im BMW-Werk München	73
Tabelle 3-2:	Darstellung der Ladungsträger: ISO-Container, SLT und ULT	77
Tabelle 4-1:	Kern-CNs auf Basis der Literaturübersicht	87
Tabelle 4-2:	Kern-CNs auf Basis der Prozessanalyse	88
Tabelle 4-3:	Kern-CNs auf Basis qualitativer Interviews	90
Tabelle 4-4:	Matching- und Merging-Prozess der theoretisch und praktisch fundierten CNs	90
Tabelle 4-5:	Repräsentative CNs	92
Tabelle 4-6:	Transformation der CNs in FRs auf oberster Ebene	93
Tabelle 4-7:	Zuweisung der FM _s zu den FRs auf oberster Ebene	96
Tabelle 4-8:	Dekomposition FR ₁ im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung	99
Tabelle 4-9:	Dekomposition FR ₁₃ im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung	100
Tabelle 4-10:	Dekomposition FR ₁₄ im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung	101
Tabelle 4-11:	Dekomposition FR ₁₄₁ im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung	102
Tabelle 4-12:	Dekomposition FR ₁₅ im Gestaltungsfeld 1 – Prozessverbesserung	103
Tabelle 4-13:	Dekomposition FR ₂ im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit	104

Tabelle 4-14:	Dekomposition FR ₂₁ im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit	105
Tabelle 4-15:	Dekomposition FR ₂₁₂ im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit	106
Tabelle 4-16:	Dekomposition FR ₂₂ im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit	107
Tabelle 4-17:	Dekomposition FR ₂₂₁ im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit	108
Tabelle 4-18:	Dekomposition FR ₂₂₂ im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit	109
Tabelle 4-19:	Dekomposition FR ₂₂₃ im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit	109
Tabelle 4-20:	Dekomposition FR ₂₃ im Gestaltungsfeld 2 – Technische Machbarkeit	110
Tabelle 4-21:	Dekomposition FR ₃ im Gestaltungsfeld 3 – Sicherheitsmanagement	111
Tabelle 4-22:	Dekomposition FR ₃₁ im Gestaltungsfeld 3 – Sicherheitsmanagement	112
Tabelle 4-23:	Dekomposition FR ₃₂ im Gestaltungsfeld 3 – Sicherheitsmanagement	114
Tabelle 4-24:	Dekomposition FR ₄ im Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement	115
Tabelle 4-25:	Dekomposition FR ₄₁ im Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement	116
Tabelle 4-26:	Dekomposition FR ₄₁₃ im Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement	118
Tabelle 4-27:	Dekomposition FR ₄₂ im Gestaltungsfeld 4 – Auftragsmanagement	118
Tabelle 4-28:	Dekomposition FR ₅ im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit	119
Tabelle 4-29:	Dekomposition FR ₅₁ im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit	120
Tabelle 4-30:	Dekomposition FR ₅₅₁ im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit	121
Tabelle 4-31:	Dekomposition FR ₅₁₂ im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit	122
Tabelle 4-32:	Dekomposition FR ₅₃ im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit	123
Tabelle 4-33:	Dekomposition FR ₅₃₁ im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit	124

Tabelle 4-34:	Dekomposition FR ₅₃₂ im Gestaltungsfeld 5 – Wirtschaftlichkeit	124
Tabelle 4-35:	Vorlage Checkliste – Prozessanalyse auf dem Werksgelände	131
Tabelle 5-1:	Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Definition des Prozesszieles	136
Tabelle 5-2:	Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Layoutanalyse	137
Tabelle 5-3:	Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Prozessidentifikation	138
Tabelle 5-4:	Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Prozessbeschreibung	140
Tabelle 5-5:	Checkliste Prozessanalyse auf dem Werksgelände – Prozessbeurteilung	140
Tabelle 5-6:	Checkliste technische Machbarkeitsprüfung – Technischer Eignungstest von Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz	142
Tabelle 5-7:	Checkliste technische Machbarkeitsprüfung – Hochwertige Umgebungskarten mit robuster und akkuratere Lokalisierung	143
Tabelle 5-8:	Checkliste technische Machbarkeitsprüfung – Umweltwahrnehmung und -verständnis durch Sensorik	144
Tabelle 5-9:	Checkliste umfassendes Sicherheitssystem – Systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen	145
Tabelle 5-10:	Checkliste umfassendes Sicherheitssystem – Sicherheitsdokumentation	146
Tabelle 5-11:	Checkliste umfassendes Sicherheitssystem – Sicherheitsunterweisung	147
Tabelle 5-12:	Checkliste intelligentes Planungs- und Steuerungssystem – Dezentrale Planung und Steuerung	148
Tabelle 5-13:	Checkliste intelligentes Planungs- und Steuerungssystem – Zentrale Statusüberwachung	149
Tabelle 5-14:	Einordnung des TractEasy in die Klassifizierungsmatrix (durchgeführt von EasyMile)	149
Tabelle 5-15:	Checkliste Kostenanalyse – Kostenaufstellung für den TractEasy	151
Tabelle 5-16:	Checkliste Kostenanalyse – Kostenaufstellung für den manuellen Referenzprozess	152
Tabelle 5-17:	Checkliste Kostenanalyse – Investitionsrechenverfahren	153

Anhang B

Tabelle B-1:	Gesamtübersicht der FR-DP-FM Zuordnung	B-1
--------------	--	-----

Anhang C

Tabelle C-1:	Vorlage Checkliste – Technische Machbarkeitsprüfung	C-1
Tabelle C-2:	Vorlage Checkliste – Umfassendes Sicherheitssystem	C-2
Tabelle C-3:	Vorlage Checkliste – Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem	C-3
Tabelle C-4:	Vorlage Checkliste – Kostenanalyse	C-4
Tabelle C-5:	Berechnung des Kapitalwertes des manuellen Prozesses mit Elektroschlepper und des automatisieren Prozesses mit AMR	C-5

Anhang A Ergänzungen zu Kapitel 3: Ist-Analyse

A.1 Prozessvisualisierung mit BPMN

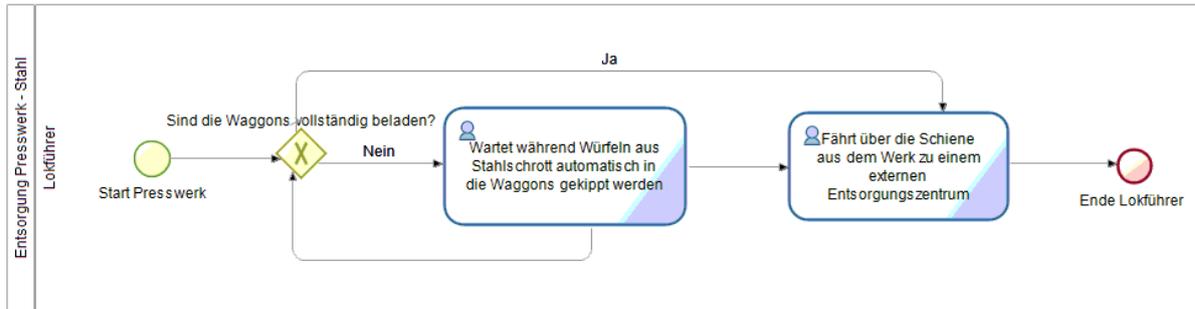


Abbildung A-1: Entsorgung Presswerk – Stahl

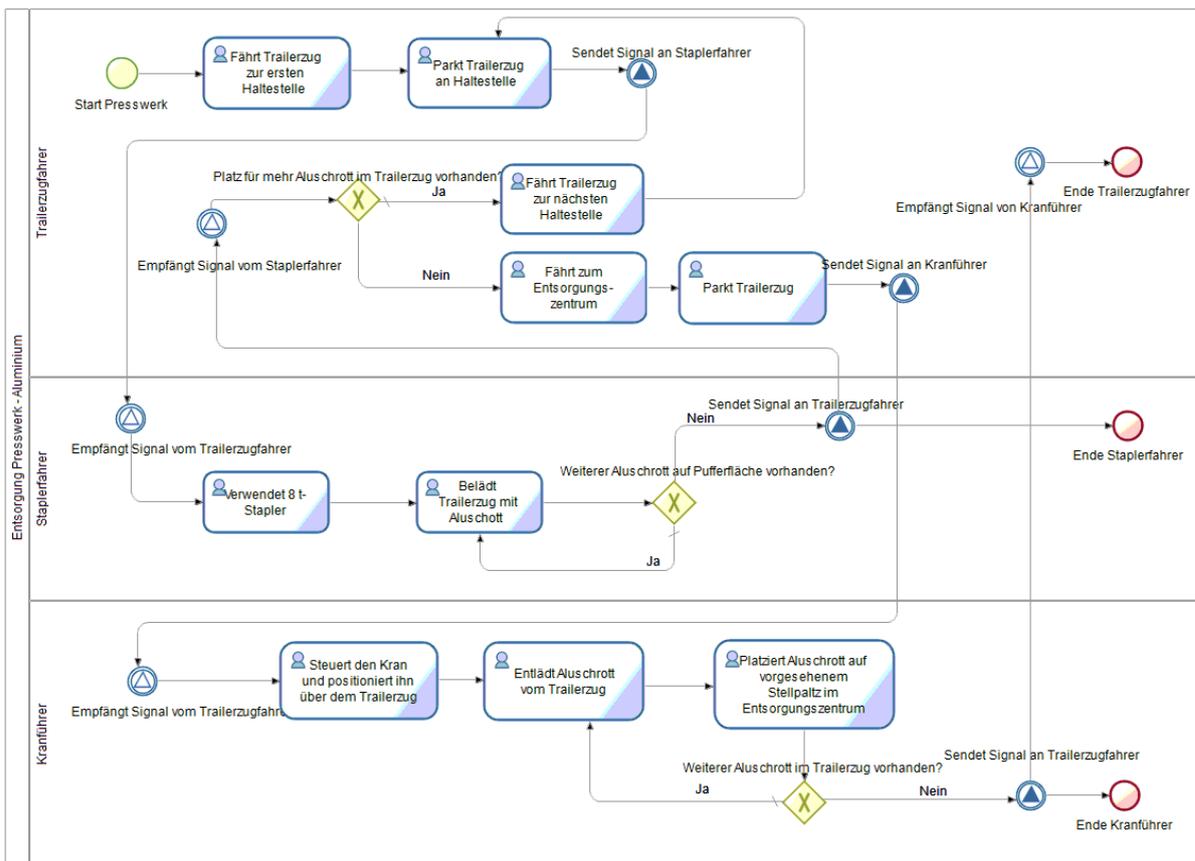


Abbildung A-2: Entsorgung Presswerk – Aluminium

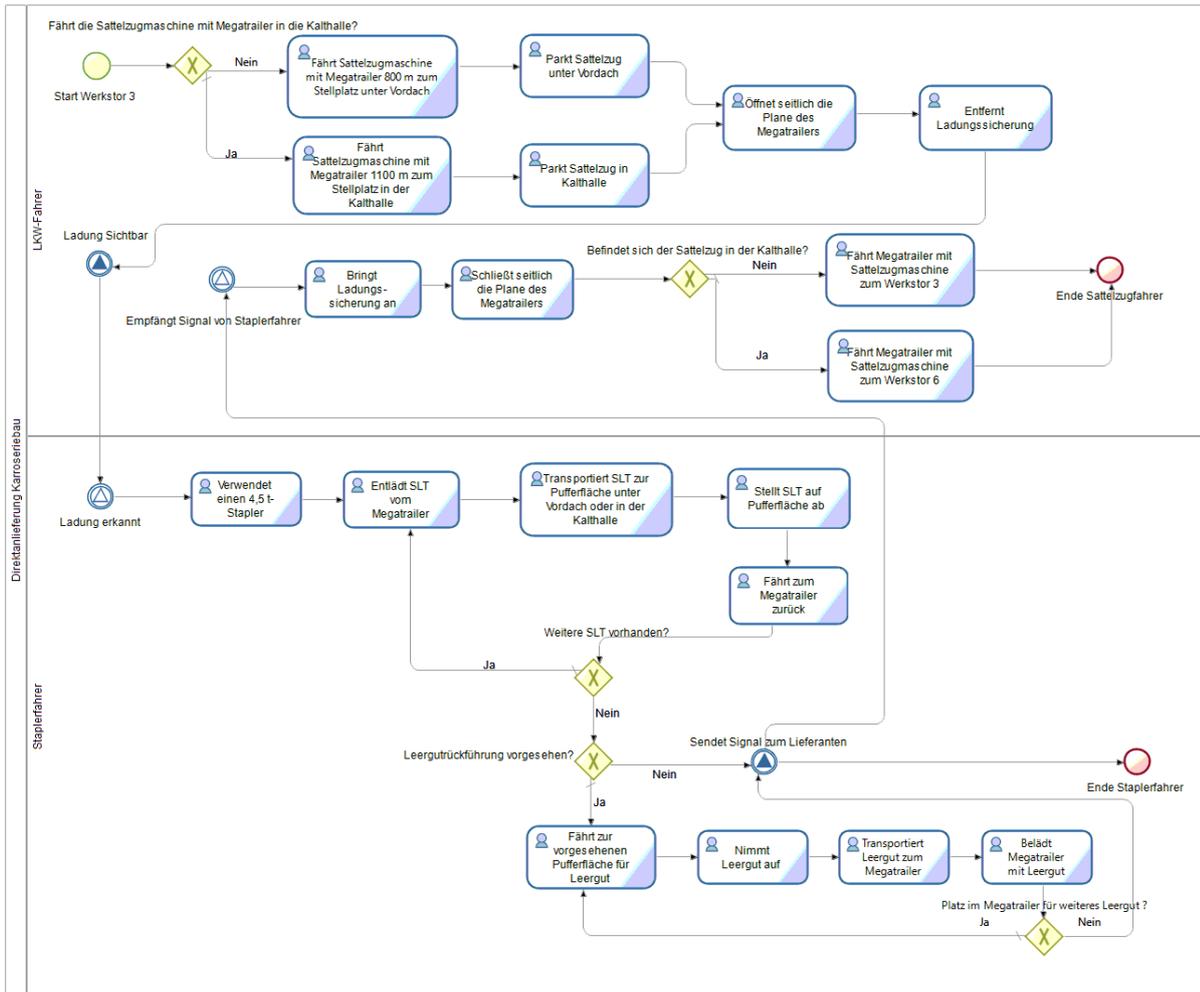


Abbildung A-3: Direktanlieferung Karosseriebau

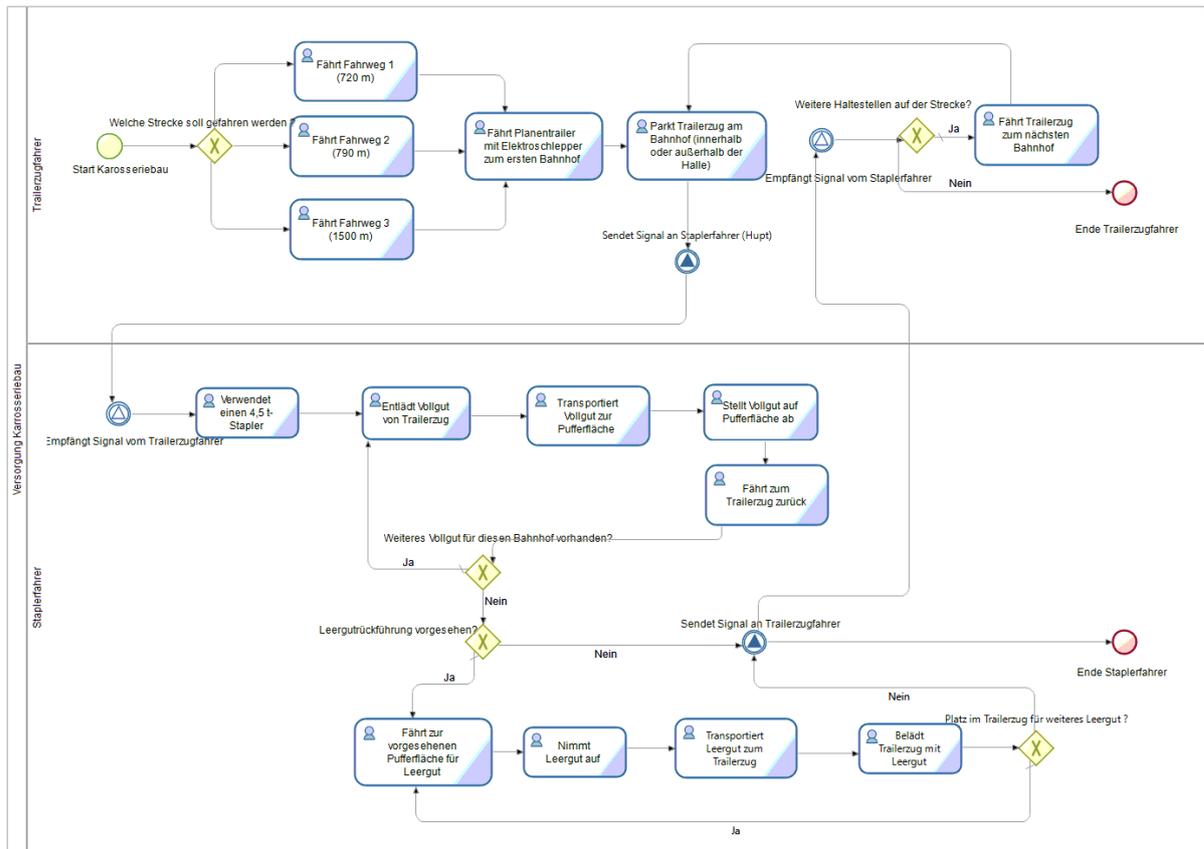


Abbildung A-4: Versorgung Karosseriebau

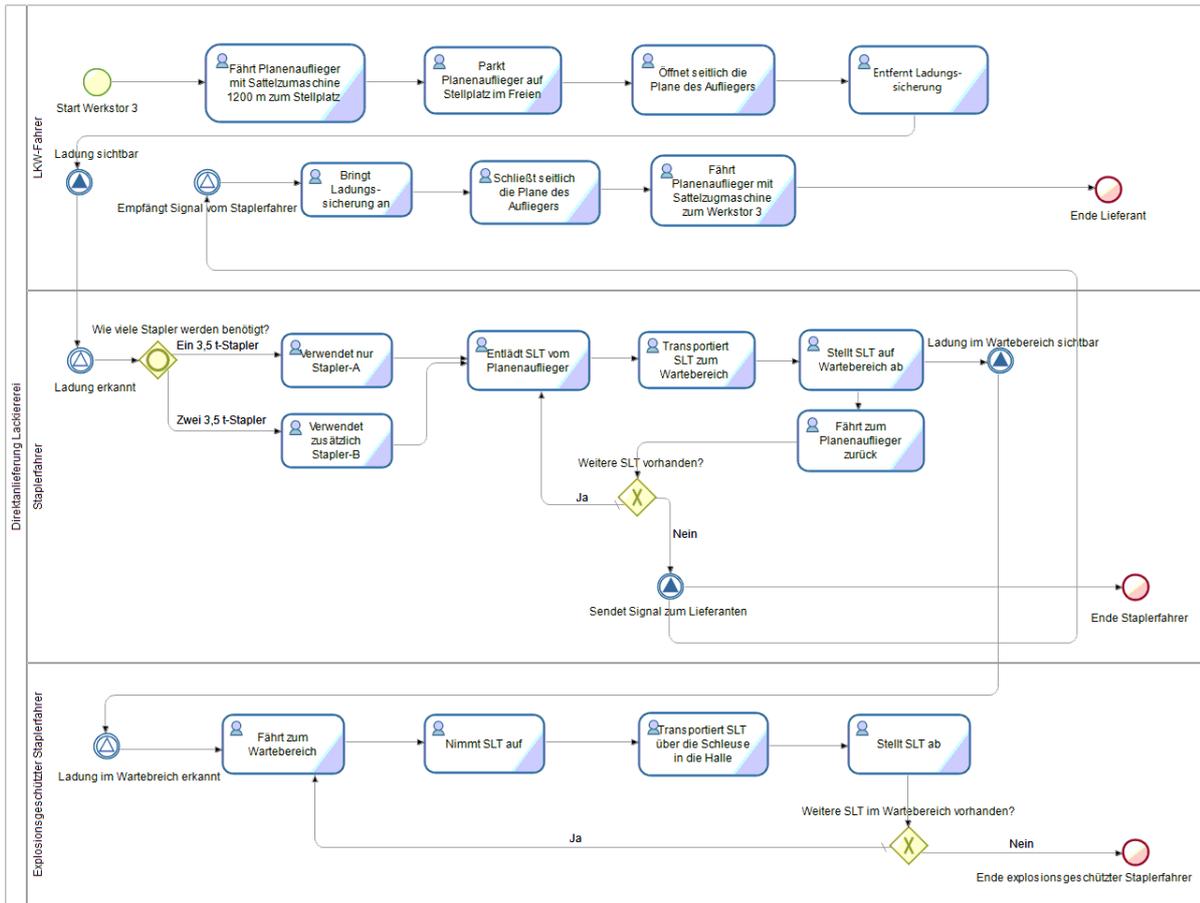


Abbildung A-5: Direktanlieferung Lackiererei

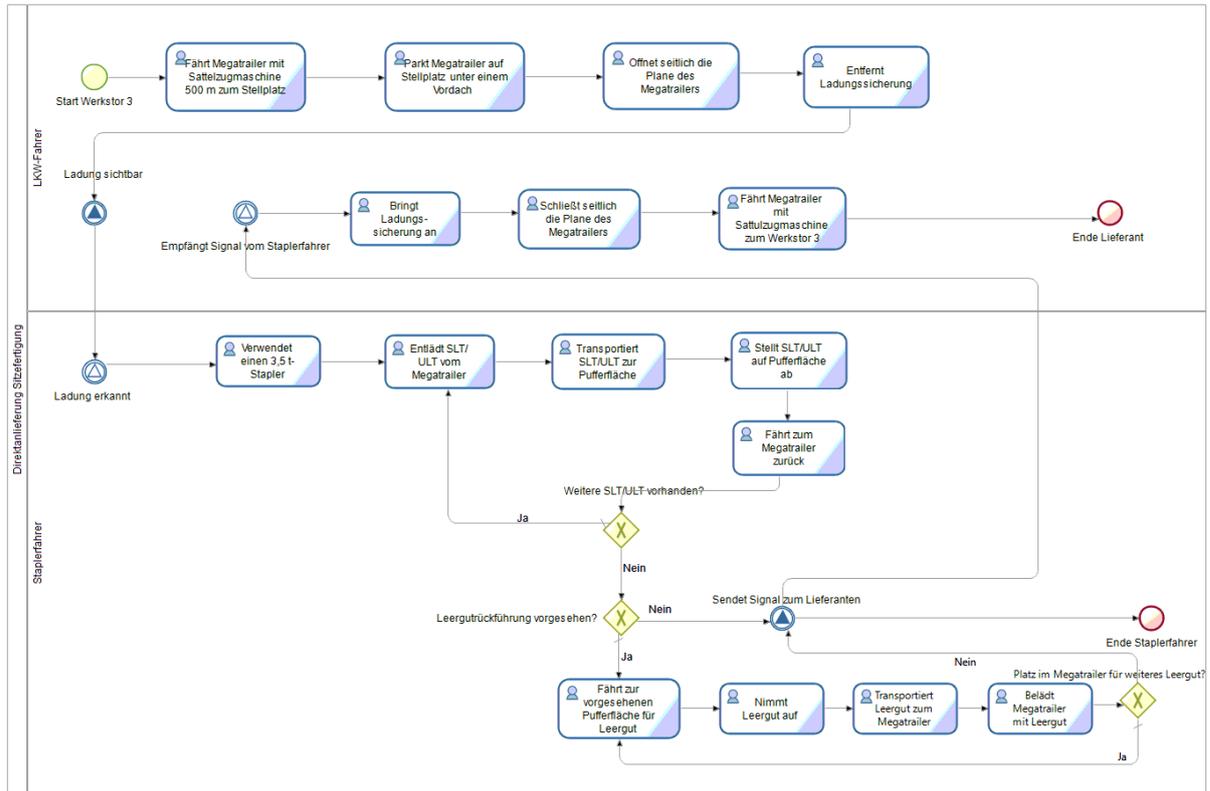


Abbildung A-6: Direktanlieferung Sitzfertigung

A Ergänzungen zu Kapitel 3: Ist-Analyse

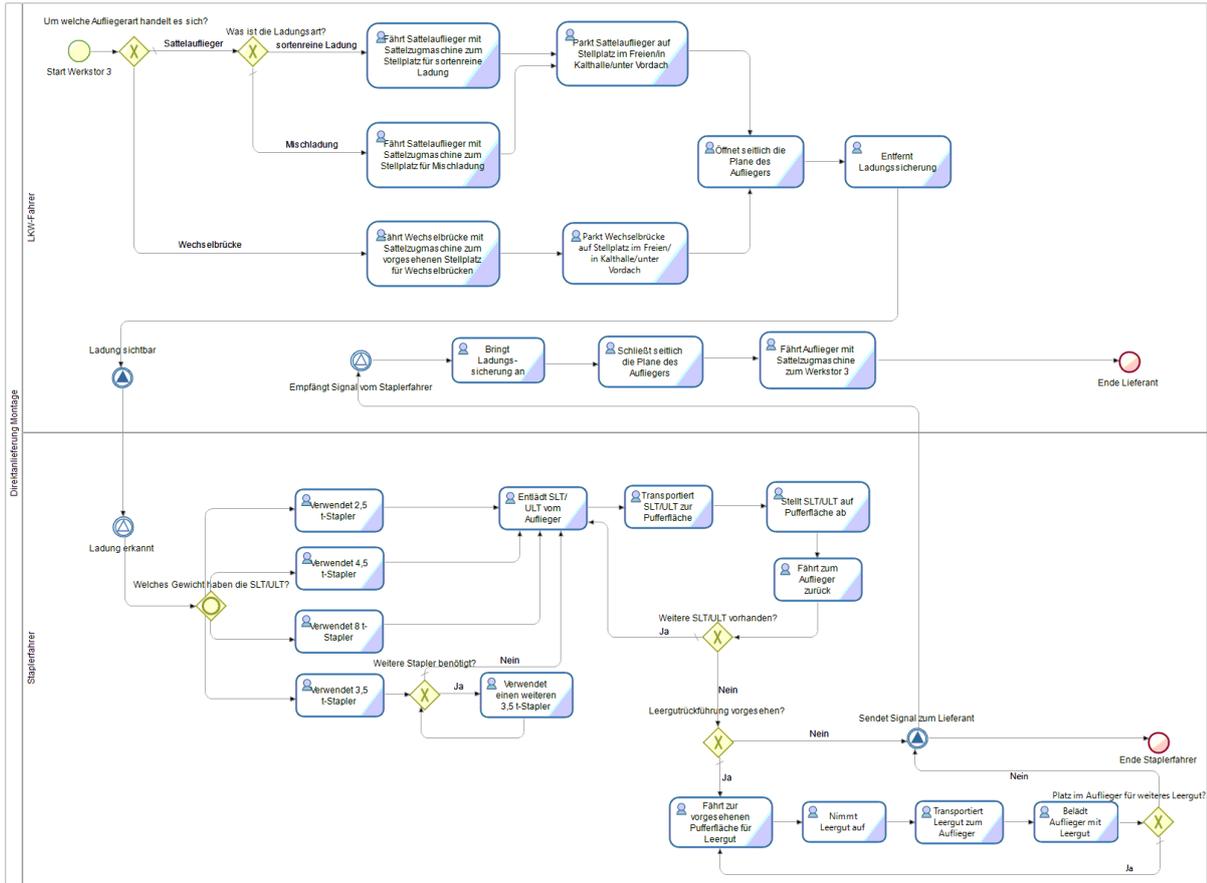


Abbildung A-7: Direktanlieferung Montage

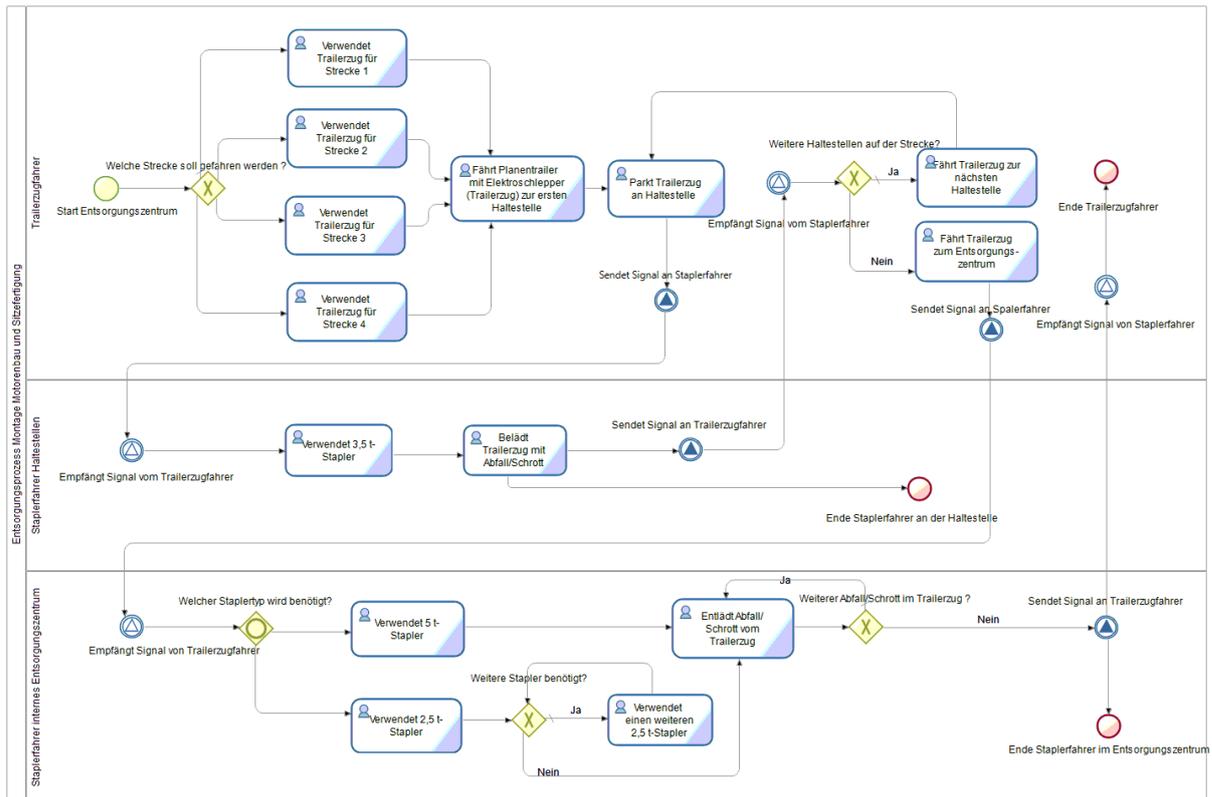


Abbildung A-8: Entsorgungsprozess Montage, Motorenbau und Sitzfertigung

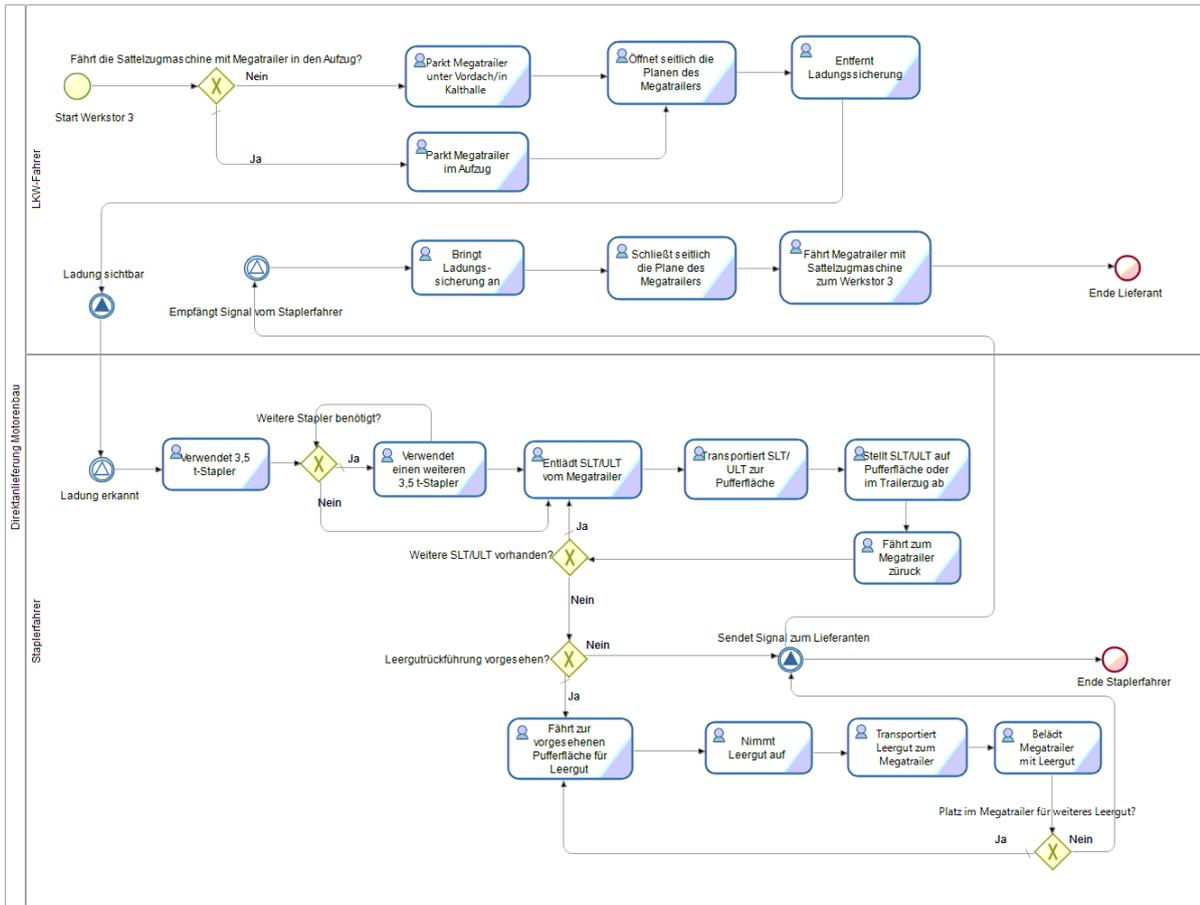


Abbildung A-9: Direktanlieferung Motorenbau

A.2 Prozessbeurteilung mit SWOT-Analysen

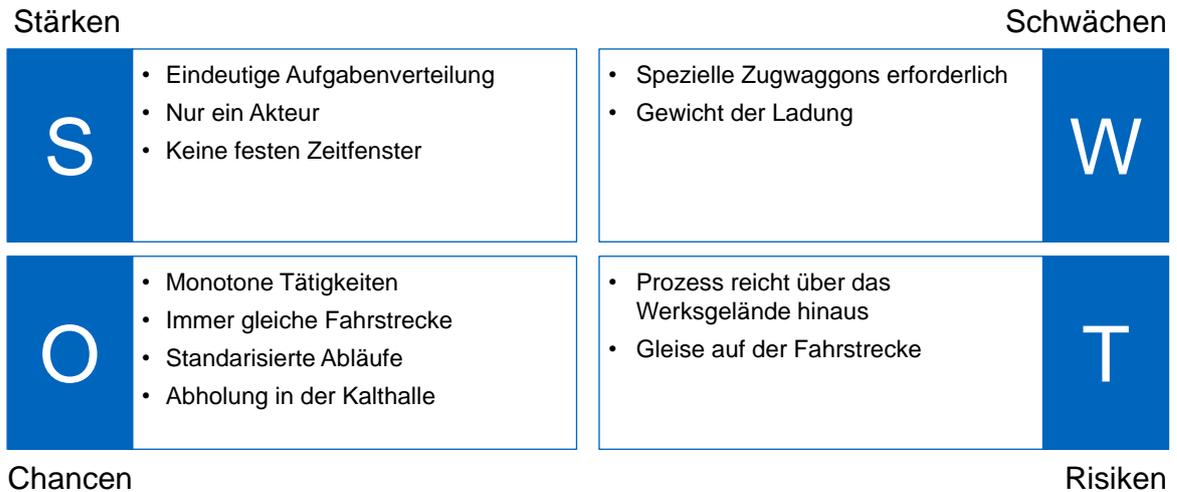


Abbildung A-10: SWOT – Entsorgung Presswerk – Stahl

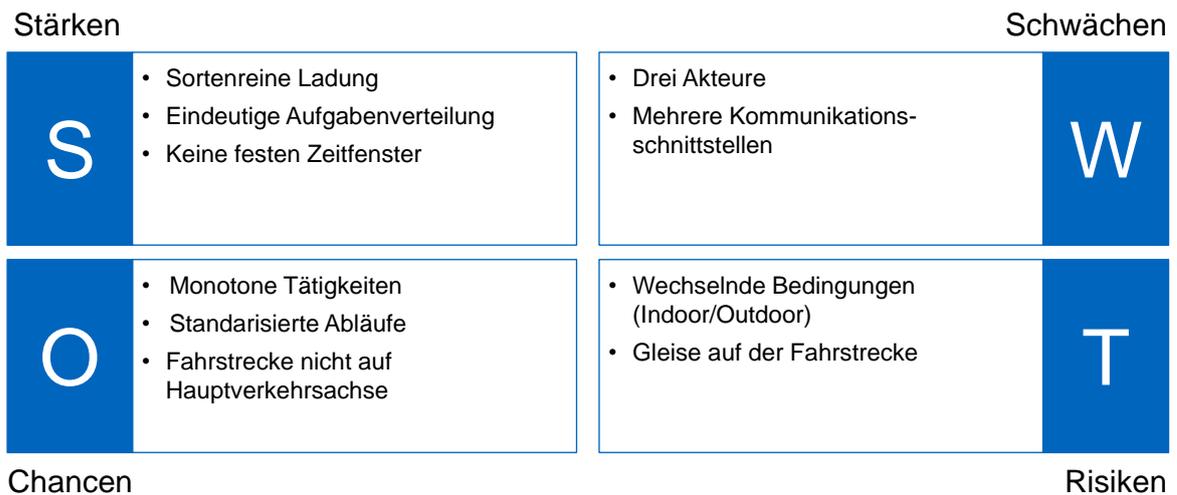


Abbildung A-11: SWOT – Entsorgung Presswerk – Aluminium

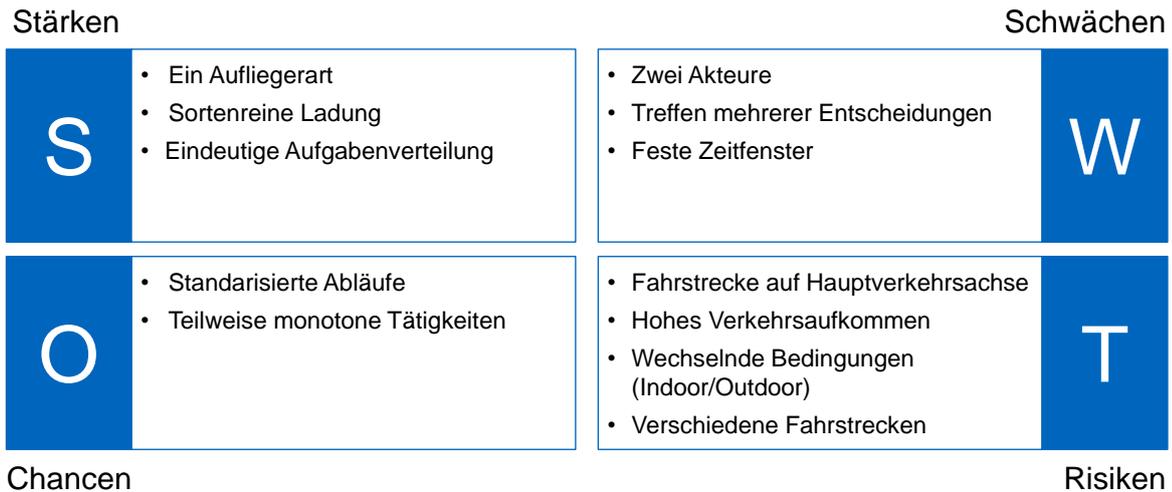


Abbildung A-12: SWOT – Direktanlieferung Karosseriebau

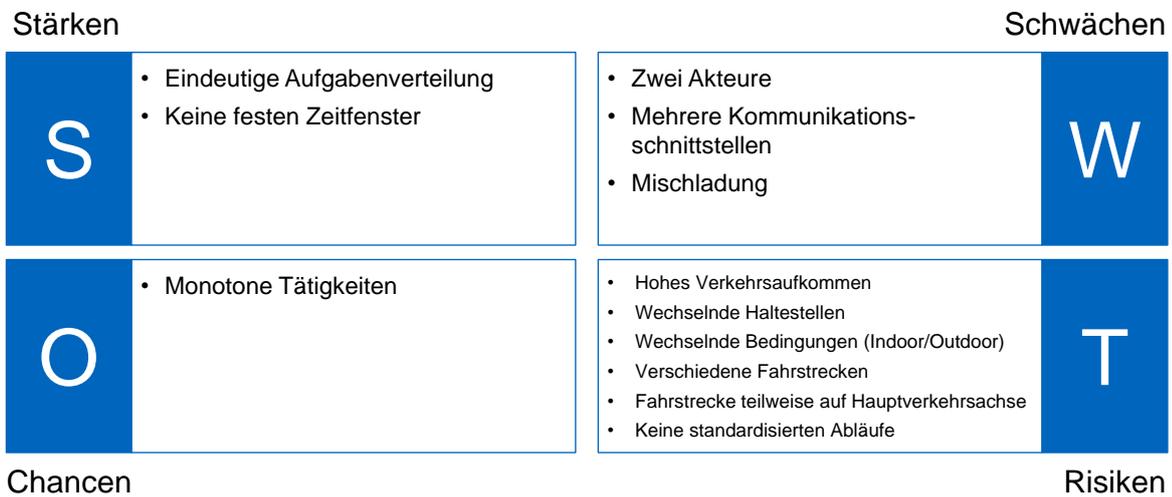


Abbildung A-13: SWOT – Versorgung Karosseriebau

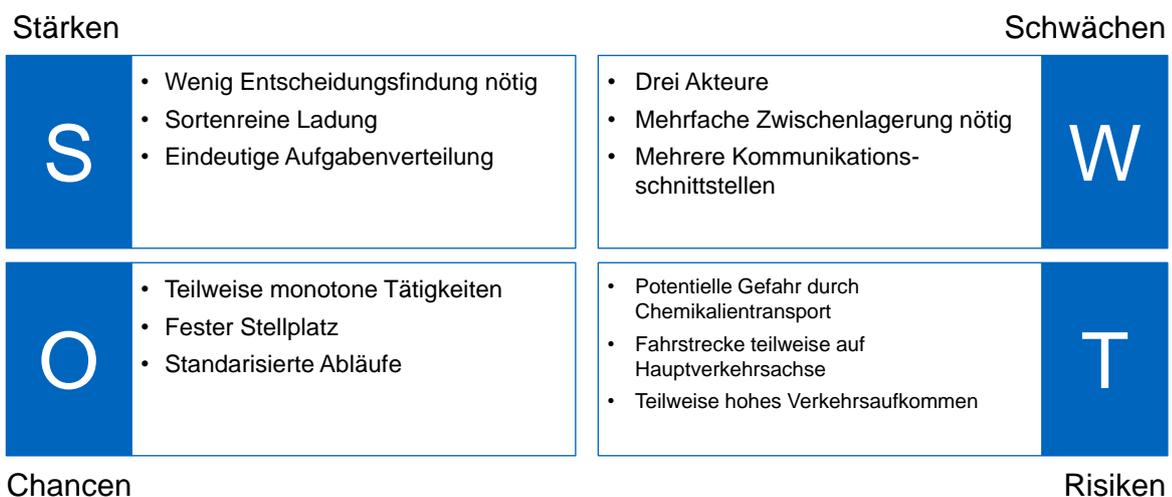


Abbildung A-14: SWOT – Direktanlieferung Lackiererei

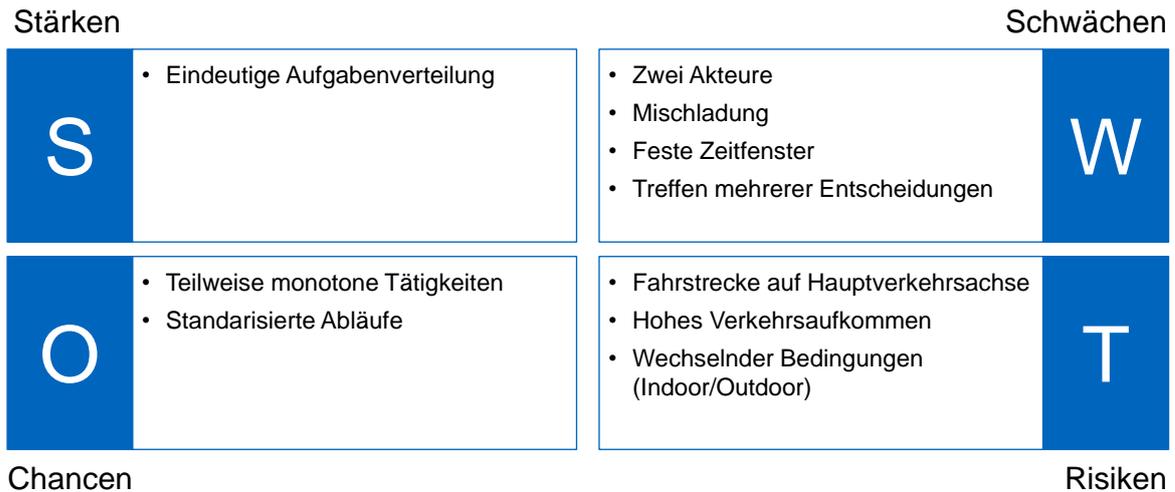


Abbildung A-15: SWOT – Direktanlieferung Sitzfertigung

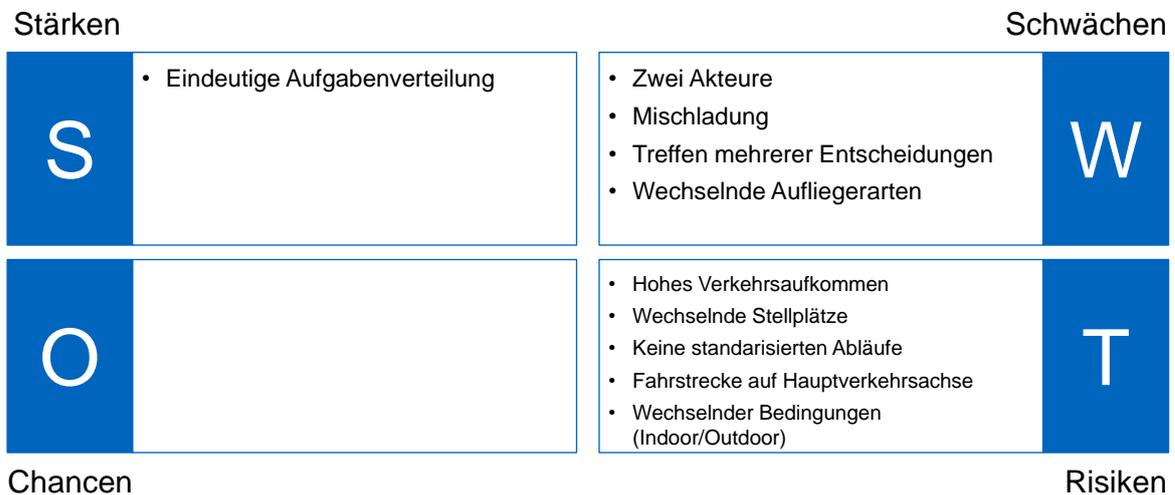


Abbildung A-16: SWOT – Direktanlieferung Montage

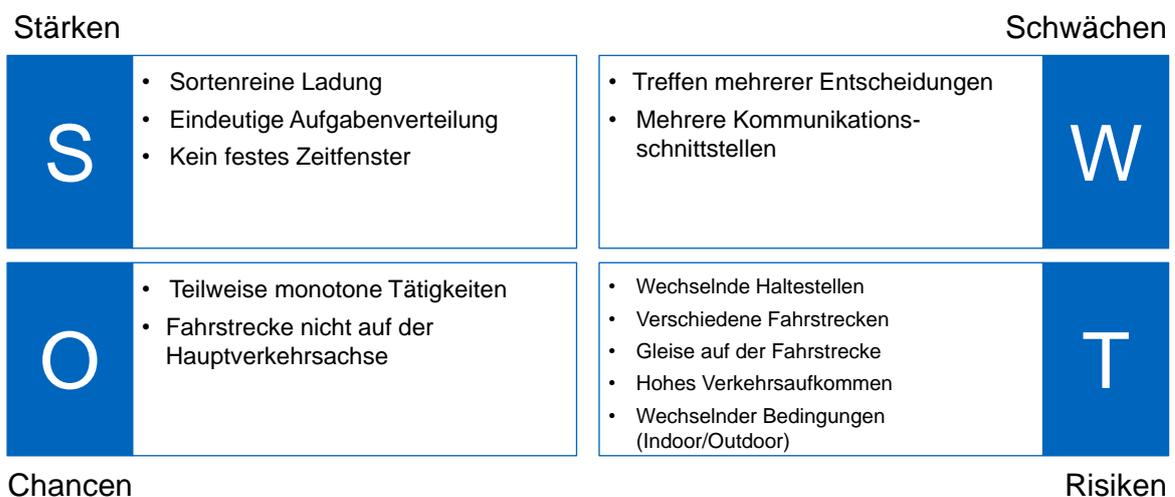


Abbildung A-17: SWOT – Entsorgungsprozess Montage, Motorenbau und Sitzfertigung

Stärken

S	<ul style="list-style-type: none">• Ein Aufliegerart• Eindeutige Aufgabenverteilung
---	--

O	<ul style="list-style-type: none">• Teilweise standardisierte Abläufe
---	---

Chancen

Schwächen

<ul style="list-style-type: none">• Zwei Akteure• Mischladung• Treffen mehrerer Entscheidungen• Feste Zeitfenster	W
--	---

<ul style="list-style-type: none">• Fahrstrecke auf Hauptverkehrsachse• Hohes Verkehrsaufkommen• Wechselnder Bedingungen (Indoor/Outdoor)• Verschiedene Fahrstrecken	T
---	---

Risiken

Abbildung A-18: SWOT – Direktanlieferung Motorenbau

Anhang B Ergänzungen zu Kapitel 4: Axiomatic Design

B.1 Dekomposition FR-DP-FM

Tabelle B-1: Gesamtübersicht der FR-DP-FM Zuordnung

DP ₀ – Gestaltungsrichtlinien für die Implementierung autonomer und robuster mobiler Roboter auf dem Werksgelände					
FR ₁	Betrieblichen Materialfluss auf dem Werksgelände verbessern	DP ₁	Prozessanalyse auf dem Werksgelände	FM ₁	Effizienz (Output-/Input-Verhältnis)
FR ₂	Unter Outdoor-Bedingungen auf dem Werksgelände robust lokalisieren und navigieren	DP ₂	Technische Machbarkeitsprüfung von Fahrzeugkomponenten und Software	FM ₂	Verfügbarkeit
FR ₃	Personenschutz gewährleisten und Kollisionen vermeiden	DP ₃	Umfassendes Sicherheitssystem	FM ₃	Häufigkeit der Unfälle/Kollisionen
FR ₄	Roboterfunktionen selbständig planen und steuern	DP ₄	Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem	FM ₄	Häufigkeit menschlicher Eingriffe
FR ₅	Wirtschaftlich effizient sein	DP ₅	Kostenanalyse	FM ₅	ROI
DP ₁ – Prozessanalyse auf dem Werksgelände					
FR ₁₁	Grund der Prozessanalyse aufzeigen	DP ₁₁	Definition Prozessziel	FM ₁₁	Effizienz
FR ₁₂	Struktur des Werksgeländes erfassen	DP ₁₂	Layoutanalyse	FM ₁₂	Granularität der Prozessunterteilung
FR ₁₃	Prozesse auf hoher Abstraktionsebene überblicken	DP ₁₃	Prozessidentifikation	FM ₁₃	Anzahl der Prozesse (in einem Subsystem)
FR ₁₄	Detaillierte Inhalte der Prozesse beschreiben	DP ₁₄	Prozessbeschreibung	FM ₁₄	Prozessoutput (Prozessoutput charakterisieren und quantifizieren)
FR ₁₅	Eignung der Prozesse überprüfen	DP ₁₅	Prozessbeurteilung	FM ₁₅	Automatisierungspotenzial
DP ₁₃ – Prozessidentifikation					
FR ₁₃₁	Prozesse erfassen	DP ₁₃₁	Prozessaufnahme	FM ₁₃₁	Verständlichkeit
FR ₁₃₂	Prozesstyp klassifizieren	DP ₁₃₂	Referenzprozesse	FM ₁₃₂	Vergleichbarkeit
FR ₁₃₃	Strategische Relevanz des Prozesses bestimmen	DP ₁₃₃	Definition Kern- und Subprozess	FM ₁₃₃	Anzahl der Kern- und Subprozesse
FR ₁₃₄	Prozesszusammenhänge erkennen	DP ₁₃₄	Definition vor- und nachgelagerter Prozess	FM ₁₃₄	Anzahl der Prozesszusammenhänge
FR ₁₃₅	Engpasssituationen erfassen	DP ₁₃₅	Lösungskonzepte	FM ₁₃₅	Theoretischer Output
DP ₁₄ – Prozessbeschreibung					
FR ₁₄₁	Detaillierte Prozessabfolgen darstellen	DP ₁₄₁	Ablaufdiagramm	FM ₁₄₁	Verständlichkeit
FR ₁₄₂	Zuständigkeiten erfassen	DP ₁₄₂	Definition Verantwortlichkeiten	FM ₁₄₂	Anzahl der Verantwortlichen
FR ₁₄₃	Benötigte Ressourcen erfassen	DP ₁₄₃	Materialflussanalyse	FM ₁₄₃	Menge der benötigten Ressourcen
FR ₁₄₄	Übergaben erfassen	DP ₁₄₄	Schnittstellendefinition	FM ₁₄₄	Anzahl der Übergaben
FR ₁₄₅	Gemeinsamkeiten und Unterschiede der einzelnen Prozesse aufzeigen	DP ₁₄₅	Definition von Leistungsindikatoren	FM ₁₄₅	Vergleichbarkeit
DP ₁₄₁ – Ablaufdiagramm					
FR ₁₄₁₁	Prozesse leicht verständlich darstellen (diagrammbasierte Methoden)	DP ₁₄₁₁	Grafische Modellierungssprache	FM ₁₄₁₁	Detaillierungsgrad
FR ₁₄₁₂	Prozesse leicht verständlich darstellen (computerbasierte Methoden)	DP ₁₄₁₂	Prozesssimulation	FM ₁₄₁₂	Detaillierungsgrad
DP ₁₅ – Prozessbeurteilung					
FR ₁₅₁	Schwachstellen und Potenziale der Prozesse erkennen	DP ₁₅₁	Schwachstellenanalyse	FM ₁₅₁	Anzahl Prozessengpässe
FR ₁₅₂	Eignung der Prozesse im Hinblick auf Automatisierung	DP ₁₅₂	Eignungsanalyse	FM ₁₅₂	Automatisierungsgrad
DP ₂ – Technische Machbarkeitsprüfung von Fahrzeugkomponenten und Software					
FR ₂₁	Zertifizierte und robuste Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz sicherstellen	DP ₂₁	Technischer Eignungstest von Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz	FM ₂₁	MTBF

B Ergänzungen zu Kapitel 4: Axiomatic Design

FR ₂₂	Robuste und nachhaltige Navigationssoftware für den Outdoor-Bereich sicherstellen	DP ₂₂	Hochwertige Umgebungskarten mit robuster und akkurater Lokalisierung	FM ₂₂	Verfügbarkeit in Operationsumgebung
FR ₂₃	Selbständig in einer dynamischen Umgebung interagieren	DP ₂₃	Umweltwahrnehmung und -verständnis durch Sensorik	FM ₂₃	Verfügbarkeit in hoch komplexer Umgebung
DP ₂₁ – Technischer Eignungstest von Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz					
FR ₂₁₁	Schutz gegen Eindringen von Fremdkörpern und Flüssigkeiten	DP ₂₁₁	Schutzart und Schutzklasse von Fahrzeugkomponenten	FM ₂₁₁	IP-Level
FR ₂₁₂	Lebensdauer der verwendeten Materialien	DP ₂₁₂	Eignungsbeurteilung verschiedener Materialien für den Outdoor-Einsatz	FM ₂₁₂	Leistungsgrenzen der Fahrzeugkomponenten
FR ₂₁₃	Zuverlässigkeit der mechatronischen Komponenten	DP ₂₁₃	Durchführung von Dauertests	FM ₂₁₃	Ausfallhäufigkeit
FR ₂₁₄	Auswahl der am besten geeigneten Kombination von Fahrzeugkomponenten	DP ₂₁₄	Klassifizierungsmodell von Fahrzeugkomponenten anhand von Leistungskriterien	FM ₂₁₄	Optimale Lebensdauer anhand vordefinierter Kriterien
DP ₂₁₂ – Eignungsbeurteilung verschiedener Materialien für den Outdoor-Einsatz					
FR ₂₁₂₁	Eignung der verbauten Fahrzeugkomponenten	DP ₂₁₂₁	Robuste Fahrzeugkomponenten	FM ₂₁₂₁	Leistungsgrenze der verbauten Fahrzeugkomponenten
FR ₂₁₂₂	Dauerhaftes Reifenmaterial	DP ₂₁₂₂	Abriebfeste Bereifung	FM ₂₁₂₂	Leistungsgrenze des Reifenmaterials
FR ₂₁₂₃	Betrachtung extremer Temperaturschwankungen	DP ₂₁₂₃	Integriertes Wärme- und Kühlsystem	FM ₂₁₂₃	Lebensdauer unter extremen Bedingungen
DP ₂₂ – Robuste und nachhaltige Navigationssoftware für den Outdoor-Bereich sicherstellen					
FR ₂₂₁	Informationen über den aktuellen Standort senden/empfangen	DP ₂₂₁	Lokalisierungstechnologien	FM ₂₂₁	Genauigkeit der Daten
FR ₂₂₂	Die eigene Position auf einer Karte jederzeit bestimmen	DP ₂₂₂	Detaillierte und synchronisierte Karte	FM ₂₂₂	Abweichung im Vergleich zur realen Position (z. B. +/- 1 m)
FR ₂₂₃	Sensorrauschen vermeiden	DP ₂₂₃	Geeignete Software- und Hardwarelösungen	FM ₂₂₃	SNR
DP ₂₂₁ – Lokalisierungstechnologien					
FR ₂₂₁₁	Die Position in einem festen Bezugssystem bestimmen	DP ₂₂₁₁	GNSS	FM ₂₂₁₁	Abweichung vom realen Wert (z. B. +/- 1 m)
FR ₂₂₁₂	Die zurückgelegte Strecke ermitteln	DP ₂₂₁₂	IMU und Odometrie	FM ₂₂₁₂	Genauigkeit der Kalibrierung
FR ₂₂₁₃	Die Position relativ zu einer bekannten Position bestimmen	DP ₂₂₁₃	Kombination von visuellen Sensoren mit Umgebungsobjekten	FM ₂₂₁₃	Robuste Erkennung
DP ₂₂₂ – Detaillierte und synchronisierte Karte					
FR ₂₂₂₁	Roboterposition kalibrieren	DP ₂₂₂₁	Definition von Rücksetzpositionen (Start- und Zielposition)	FM ₂₂₂₁	Genauigkeit von bekannten Positionen
FR ₂₂₂₂	Karte kontinuierlich aktualisieren	DP ₂₂₂₂	SLAM-Algorithmen	FM ₂₂₂₂	Aktualisierungsfrequenz
FR ₂₂₂₃	Mögliche Fahrbereiche eingrenzen	DP ₂₂₂₃	Definition von Fahr- und Sperrbereichen auf der Karte	FM ₂₂₂₃	Eindeutige Grenzen
DP ₂₂₃ – Geeignete Software- und Hardwarelösungen verwenden					
FR ₂₂₃₁	Geeignete Softwarelösung für die Reduzierung von Sensorrauschen	DP ₂₂₃₁	Sensorauswertung mit geeigneten Algorithmen	FM ₂₂₃₁	Abweichung zum realen Wert (z. B. +/- 1 m)
FR ₂₂₃₂	Geeignete Hardwarelösung für die Reduzierung von Sensorrauschen	DP ₂₂₃₂	Einbau redundanter Sensorik	FM ₂₂₃₂	Störanfälligkeit der Sensoren in Bezug auf externe Einflüsse
DP ₂₃ – Umweltwahrnehmung und -verständnis durch Sensorik					
FR ₂₃₁	Ausreichende Informationen aus den Sensoren erhalten	DP ₂₃₁	Daten von Kameras und Laserscannern (2D/3D)	FM ₂₃₁	Dichte der Punktwolke
FR ₂₃₂	Sensordaten verarbeiten	DP ₂₃₂	Sensorfusion	FM ₂₃₂	Ergebnisqualität
FR ₂₃₃	Auf unterschiedliche Szenarien reagieren	DP ₂₃₃	Definition von Reaktionsszenarien basierend auf der Umgebung	FM ₂₃₃	Reaktionsfähigkeit
DP ₃ – Umfassendes Sicherheitssystem					
FR ₃₁	Sicherstellen, dass keine Gefahr vom AMR ausgeht	DP ₃₁	Systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen	FM ₃₁	Anzahl der als Gefahr erkannten Situation
FR ₃₂	Sicherheitsrelevante Aspekte des AMR zusammentragen	DP ₃₂	Sicherheitsdokumentation	FM ₃₂	Vollständigkeit der Dokumente
FR ₃₃	Relevante Personengruppen über die Sicherheit und Funktionalität des AMR informieren	DP ₃₃	Sicherheitsunterweisung	FM ₃₃	Anzahl der unterwiesenen Personen
DP ₃₁ – Systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen					
FR ₃₁₁	Sicherheitsrichtlinien und Normen einhalten	DP ₃₁₁	CE-Kennzeichnung	FM ₃₁₁	Erfüllungsgrad
FR ₃₁₂	Betrieb auch bei Ausfall des AMR sicherstellen	DP ₃₁₂	Notfallprozess/-strategie	FM ₃₁₂	Verfügbarkeit
FR ₃₁₃	Verschmutzung und Emissionen des AMR reduzieren	DP ₃₁₃	Prüfung der Anforderungen an den Umweltschutz	FM ₃₁₃	Ausgestoßene Schadstoffe

FR ₃₁₄	Datentransfer zum AMR sicherstellen	DP ₃₁₄	Stabile Netzwerkverbindung	FM ₃₁₄	Menge an Datenverlust
FR ₃₁₅	Störungen am AMR frühzeitig erkennen	DP ₃₁₅	Fehlermeldesystem	FM ₃₁₅	Meldegeschwindigkeit
DP ₃₂ – Sicherheitsdokumentation					
FR ₃₂₁	Gefahrenstellen am AMR identifizieren	DP ₃₂₁	Risikobeurteilung	FM ₃₂₁	Wahrscheinlichkeit der Gefahren am AMR
FR ₃₂₂	Potenzielle Gefahrenstellen in der Umgebung beseitigen	DP ₃₂₁	Gefährdungsbeurteilung	FM ₃₂₂	Wahrscheinlichkeit der Gefahren in der Umgebung
FR ₃₂₃	Sicherstellen robuster Sicherheitseinrichtungen	DP ₃₂₃	Funktionstests von Sicherheitseinrichtungen	FM ₃₂₃	Verfügbarkeit
DP ₃₃ – Sicherheitsunterweisung					
DP ₄ – Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem					
FR ₄₁	Sich auf lokaler Ebene selbständig organisieren	DP ₄₁	Dezentrale Planung und Steuerung	FM ₄₁	Häufigkeit menschlicher Eingriffe
FR ₄₂	Globale Informationen bereitstellen	DP ₄₂	Zentrale Statusüberwachung	FM ₄₂	Koordinationsaufwand
DP ₄₁ – Dezentrale Planung und Steuerung					
FR ₄₁₁	Über Informationen verfügen	DP ₄₁₁	Anbindung an Dateninfrastruktur	FM ₄₁₁	Qualität verfügbarer Informationen
FR ₄₁₂	Mit der Umwelt kommunizieren und interagieren	DP ₄₁₂	Hohe Interaktion zwischen unabhängigen Systemelementen	FM ₄₁₂	Konnektivitätsgrad
FR ₄₁₃	Flexible und selbständige Entscheidungsfindung auf lokaler Ebene	DP ₄₁₃	Dezentralisierte Entscheidungsfindung	FM ₄₁₃	Flexibilität/Abhängigkeit
FR ₄₁₄	Selbständige Anpassung an ungeplante und externen Einflussfaktoren	DP ₄₁₄	Autonom agierende Systeme	FM ₄₁₄	Autonomiegrad
DP ₄₁₃ – Dezentralisierte Entscheidungsfindung					
FR ₄₁₃₁	Situationen verstehen	DP ₄₁₃₁	Kognitive Fähigkeiten	FM ₄₁₃₁	Konfidenzintervall
FR ₄₁₃₂	Entscheidungen selbständig treffen	DP ₄₁₃₂	Entscheidungsfähigkeit basierend auf KI	FM ₄₁₃₂	Häufigkeit menschlicher Eingriffe
FR ₄₁₃₃	Aus Handlungen lernen	DP ₄₁₃₃	Maschinelles Lernen	FM ₄₁₃₃	Qualität der Trainingsdaten
DP ₄₂ – Zentrale Statusüberwachung					
FR ₄₂₁	Ad hoc auf globale Ereignisse reagieren	DP ₄₂₁	Globale Echtzeit-Informationen über die Umgebung sammeln	FM ₄₂₁	Überwachungsreichweite
FR ₄₂₂	Koordinieren globaler Informationen	DP ₄₂₂	Globaler Koordinator	FM ₄₂₂	Planungsdauer/Planungsgenauigkeit
FR ₄₂₃	Bereitstellen globaler Informationen	DP ₄₂₃	Globale Echtzeit-Informationen über die Umgebung übermitteln	FM ₄₂₃	Kommunikationsreichweite
DP ₅ – Kostenanalyse					
FR ₅₁	Kosten für den AMR aufschlüsseln	DP ₅₁	Kostenaufstellung für den AMR	FM ₅₁	Transparenz
FR ₅₂	Kosten für den manuellen Referenzprozess aufschlüsseln	DP ₅₂	Kostenaufstellung für den manuellen Referenzprozess	FM ₅₂	Transparenz
FR ₅₃	Finanzielle Vorteilhaftigkeit der beiden Investitionen ermitteln	DP ₅₃	Investitionsrechenverfahren	FM ₅₃	Rentabilität
DP ₅₁ – Kostenaufstellung für den AMR					
FR ₅₁₁	Einmalige Kosten des AMR erfassen	DP ₅₁₁	Computergestütztes Tool für die einmaligen Kosten des AMR	FM ₅₁₁	Transparenz
FR ₅₁₂	Laufende Kosten des AMR schätzen	DP ₅₁₂	Computergestütztes Tool für die laufenden Kosten des AMR	FM ₅₁₂	Transparenz
DP ₅₁₁ – Computergestütztes Tool für die einmaligen Kosten des AMR					
FR ₅₁₁₁	Anschaffungskosten erfassen	DP ₅₁₁₁	Eingabefunktion für Anschaffungskosten	FM ₅₁₁₁	Transparenz
FR ₅₁₁₂	Kosten für die Inbetriebnahme erfassen	DP ₅₁₁₂	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Inbetriebnahme	FM ₅₁₁₂	Transparenz
FR ₅₁₁₃	Kosten für die Infrastrukturanpassung erfassen	DP ₅₁₁₃	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Infrastrukturanpassung	FM ₅₁₁₃	Transparenz
DP ₅₁₂ – Computergestütztes Tool für die laufenden Kosten eines AMR					
FR ₅₁₂₁	Fixe Kosten ermitteln	DP ₅₁₂₁	Eingabefunktion mit Abschätzung für die fixen Kosten	FM ₅₁₂₁	Transparenz
FR ₅₁₂₂	Variable Kosten ermitteln	DP ₅₁₂₂	Eingabefunktion mit Abschätzung für die variablen Kosten	FM ₅₁₂₂	Transparenz
DP ₅₃ – Investitionsrechenverfahren					
FR ₅₃₁	Durchschnittswert aller zu erwartenden Kosten einer Investition zu einem bestimmten Zeitpunkt ermitteln	DP ₅₃₁	Statische Verfahren	FM ₅₃₁	Rentabilität
FR ₅₃₂	Einnahmen und Ausgaben einer Investition über den Zeitraum mehrerer Perioden ermitteln	DP ₅₃₂	Dynamische Verfahren	FM ₅₃₂	Rentabilität
DP ₅₃₁ – Statische Verfahren					

B Ergänzungen zu Kapitel 4: Axiomatic Design

<i>FR</i> ₅₃₁₁	Kosten zweier Investitionsprojekte gegenüberstellen	<i>DP</i> ₅₃₁₁	Kostenvergleichsrechnung	<i>FM</i> ₅₃₁₁	Kostengröße
<i>FR</i> ₅₃₁₂	Gewinnbeitrag zweier Investitionsprojekte gegenüberstellen	<i>DP</i> ₅₃₁₂	Gewinnvergleichsrechnung	<i>FM</i> ₅₃₁₂	Durchschnittlicher Periodengewinn
<i>FR</i> ₅₃₁₃	Möglichst hohe Verzinsung des eingesetzten Kapitals erzielen	<i>DP</i> ₅₃₁₃	Rentabilitätsrechnung	<i>FM</i> ₅₃₁₃	Verhältnis von Verzinsung zum Vergleichzinssatz
<i>FR</i> ₅₃₁₄	Zeitraum in der sich die Investitionsausgaben selbst finanziert haben ermitteln	<i>DP</i> ₅₃₁₄	Amortisationsrechnung	<i>FM</i> ₅₃₁₄	Amortisationsdauer
DP₅₃₂ – Dynamische Verfahren					
<i>FR</i> ₅₃₂₁	Barwert von Aus- und Einzahlungen ermitteln	<i>DP</i> ₅₃₂₁	Kapitalwertmethode	<i>FM</i> ₅₃₂₁	Kapitalwert
<i>FR</i> ₅₃₂₂	Mittlere, jährliche Rendite ermitteln	<i>DP</i> ₅₃₂₂	Interne Zinssatzmethode	<i>FM</i> ₅₃₂₂	Vergleich interner Zinssatz und Kapitalmarktzinssatz
<i>FR</i> ₅₃₂₃	Jährlichen Mehrertrag einer Investition ermitteln	<i>DP</i> ₅₃₂₃	Annuitätenmethode	<i>FM</i> ₅₃₂₃	Annuität > 0

B.2 FR-DP-Baumstruktur (Tree Chart)

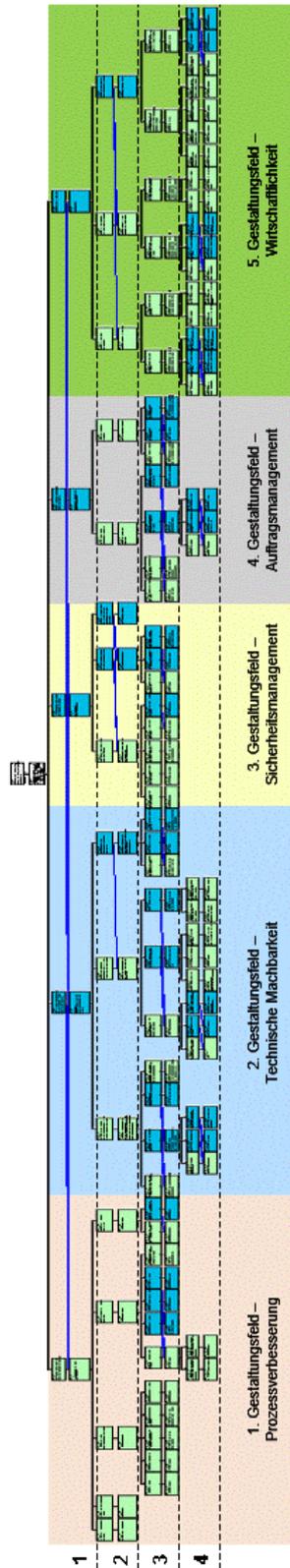


Abbildung B-1: Grobübersicht FR-DP-Baumstruktur in der Software Acclaro DFSS mit Gestaltungsfeldern (grün: ungekoppelt, blau: entkoppelt, rot: gekoppelt)

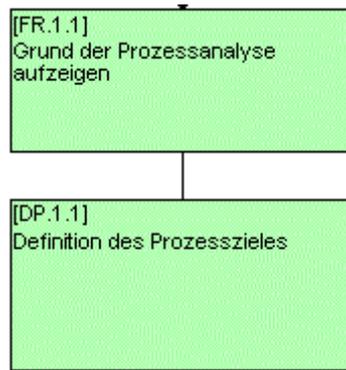


Abbildung B-2: FR_{11} - DP_{11} -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung

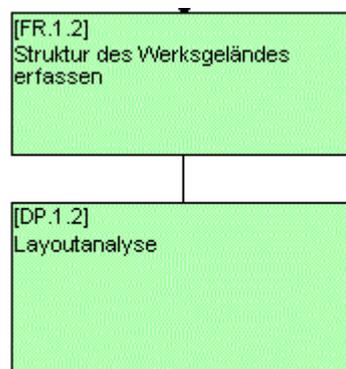


Abbildung B-3: FR_{12} - DP_{12} -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung

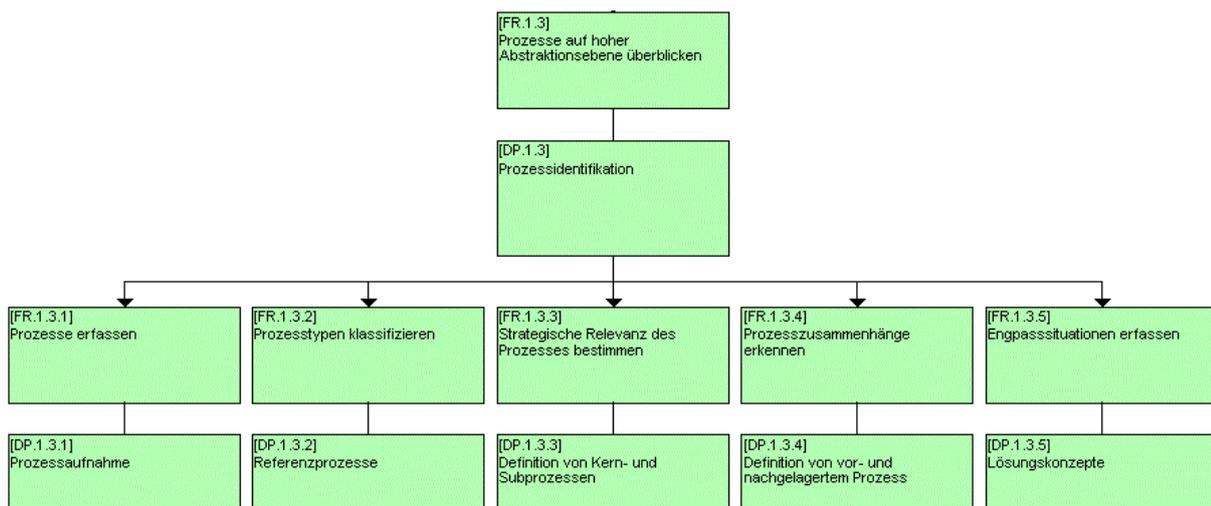


Abbildung B-4: FR_{13} - DP_{13} -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung

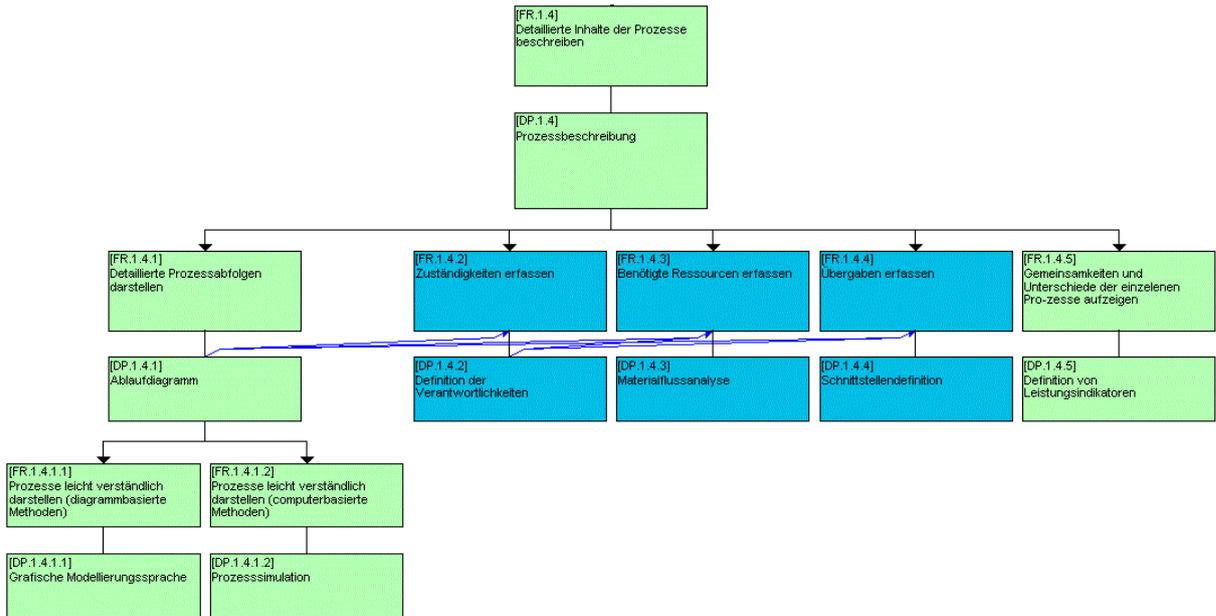


Abbildung B-5: FR_{14} - DP_{14} -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung

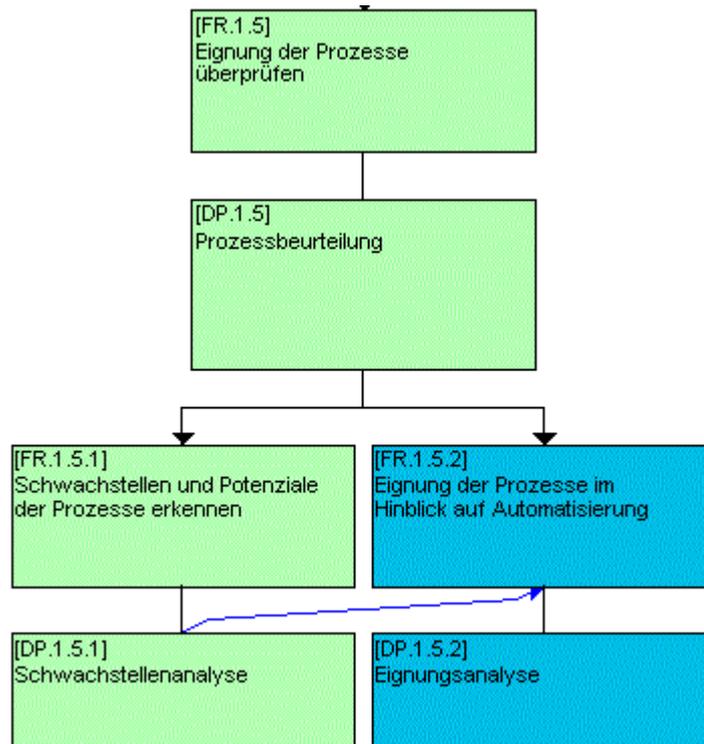


Abbildung B-6: FR_{15} - DP_{15} -Baum Gestaltungsfeld – Prozessverbesserung

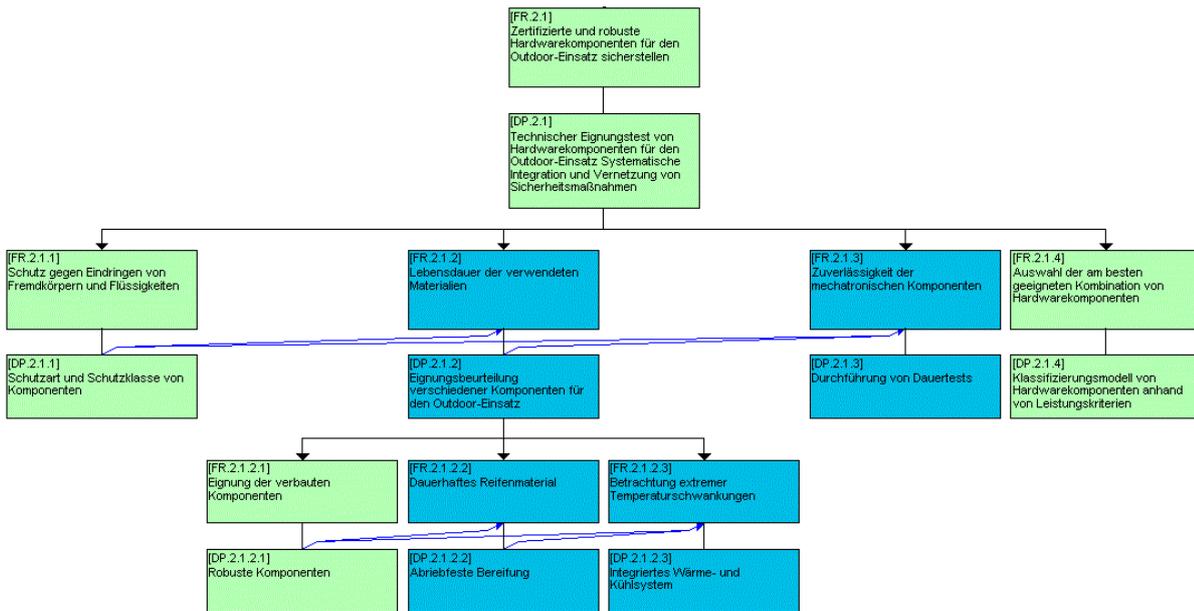


Abbildung B-7: $FR_{2.1}$ - $DP_{2.1}$ -Baum Gestaltungsfeld – Technische Machbarkeit

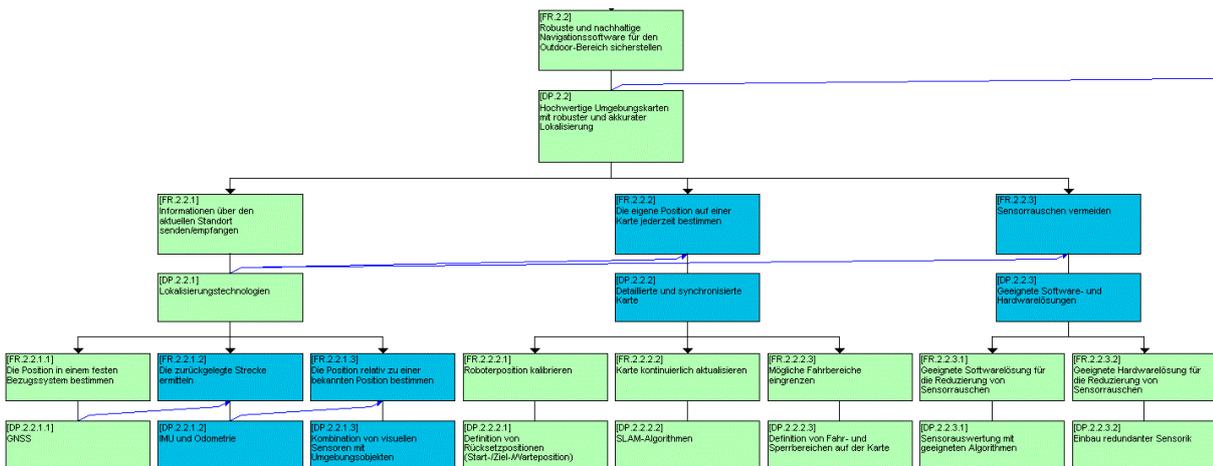


Abbildung B-8: $FR_{2.2}$ - $DP_{2.2}$ -Baum Gestaltungsfeld – Technische Machbarkeit

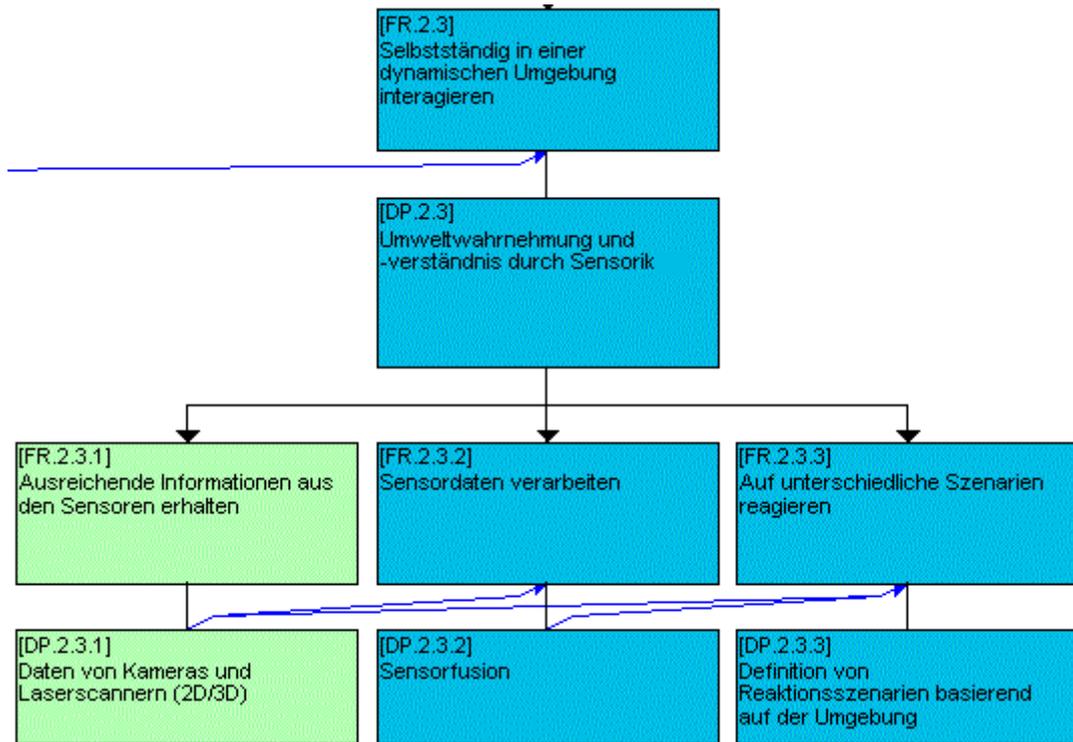


Abbildung B-9: FR_{23} - DP_{23} -Baum Gestaltungsfeld – Technische Machbarkeit

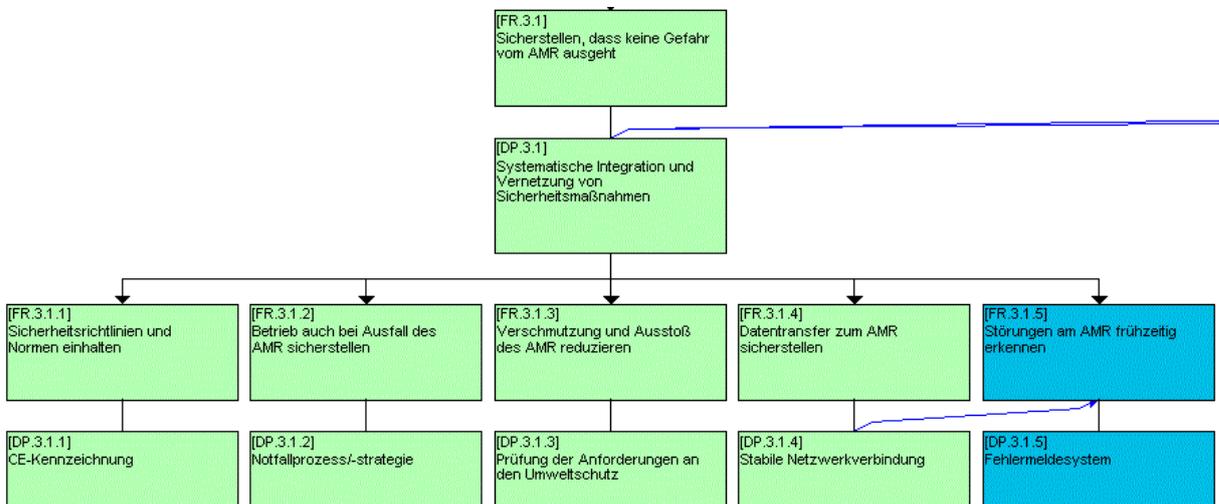


Abbildung B-10: FR_{31} - DP_{31} -Baum Gestaltungsfeld – Sicherheitsmanagement

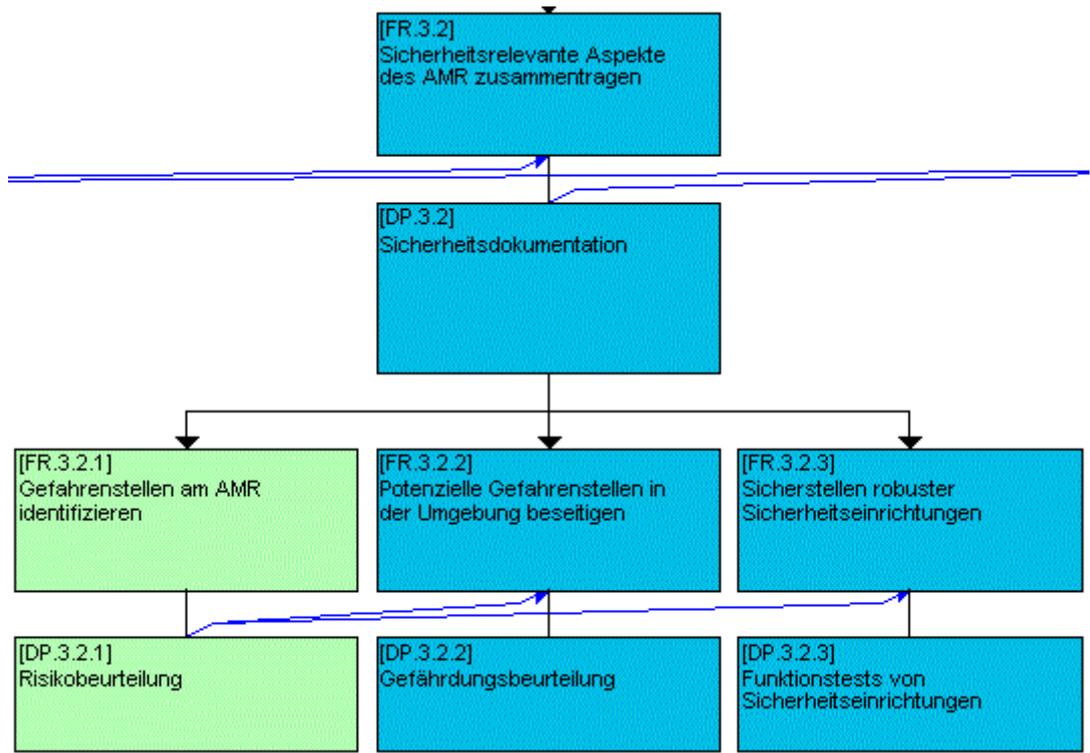


Abbildung B-11: FR_{32} - DP_{32} -Baum Gestaltungsfeld – Sicherheitsmanagement

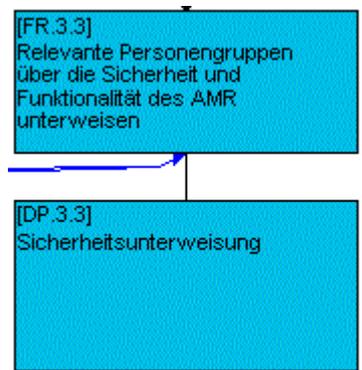


Abbildung B-12: FR_{33} - DP_{33} -Baum Gestaltungsfeld – Sicherheitsmanagement

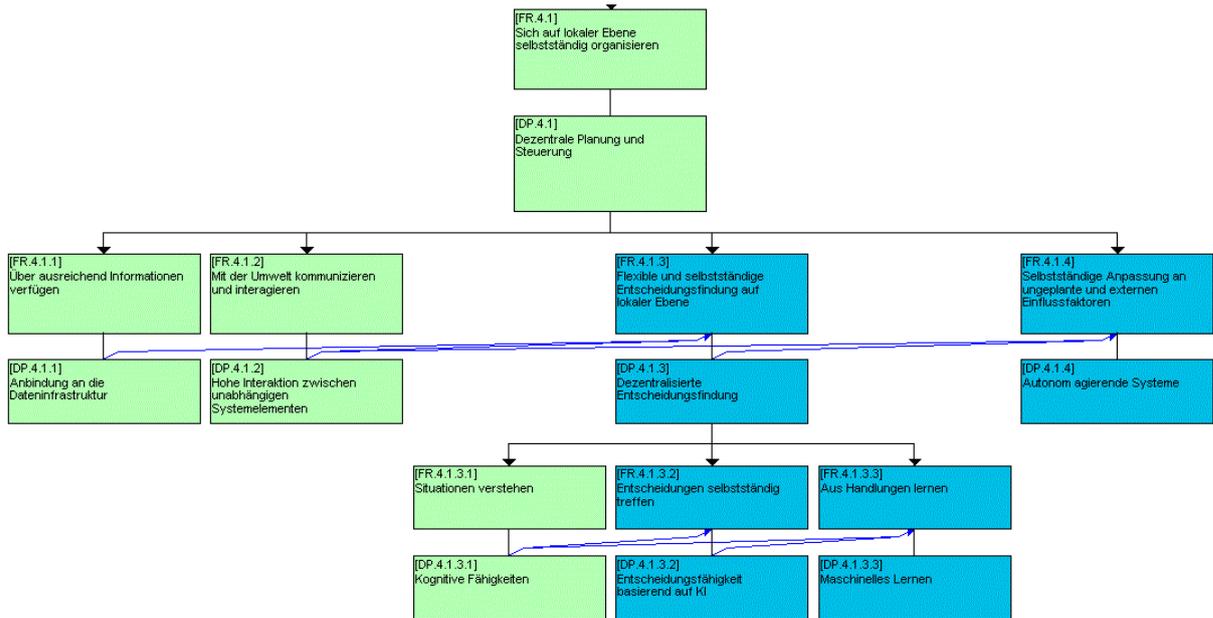


Abbildung B-13: FR_{41} - DP_{41} -Baum Gestaltungsfeld – Auftragsmanagement

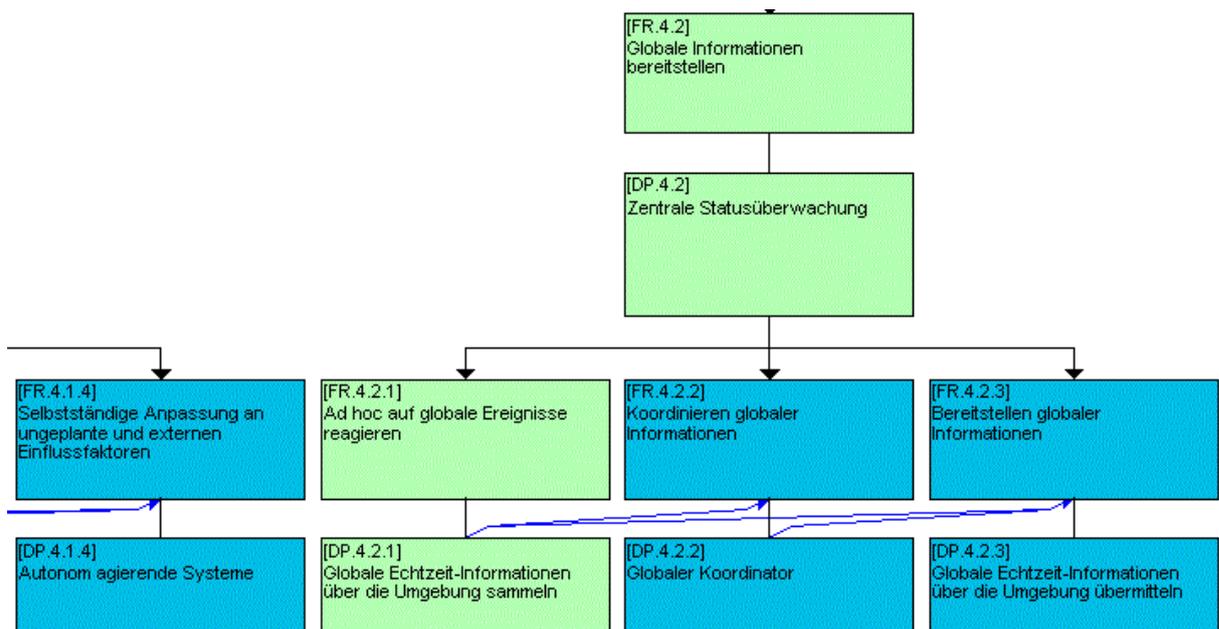


Abbildung B-14: FR_{42} - DP_{42} -Baum Gestaltungsfeld – Auftragsmanagement

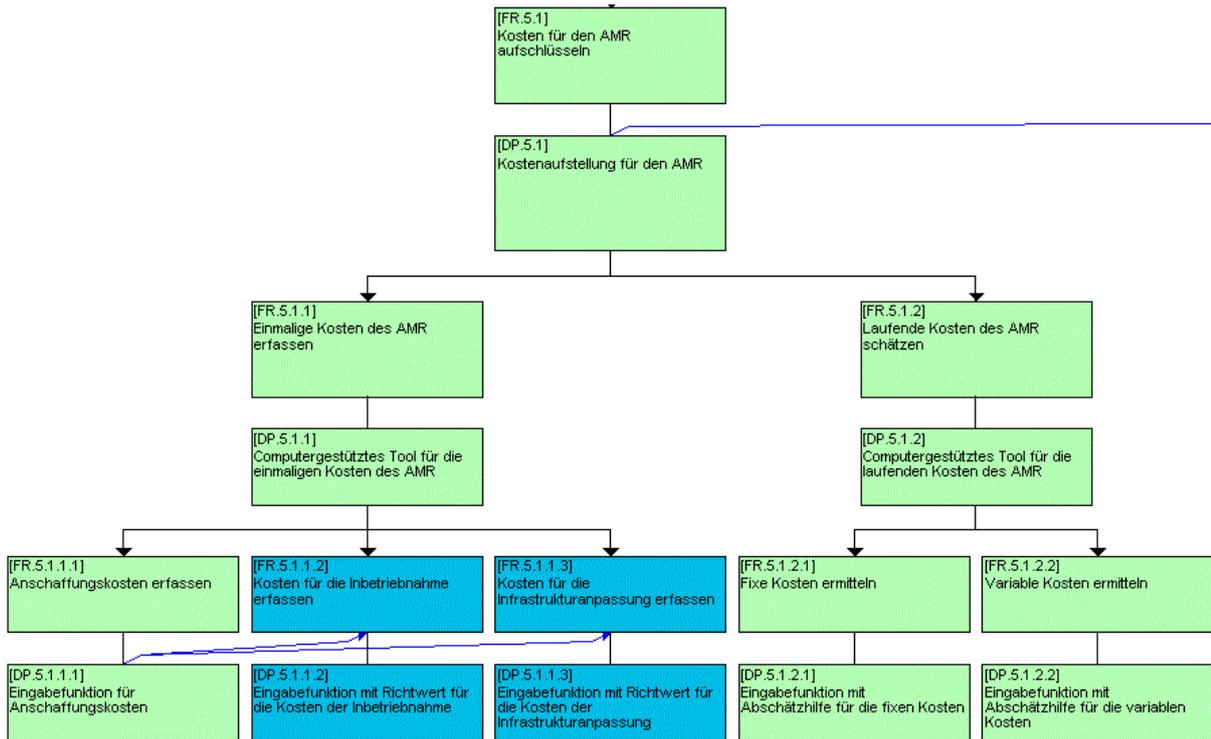


Abbildung B-15: FR_{51} - DP_{51} -Baum Gestaltungsfeld – Wirtschaftlichkeit

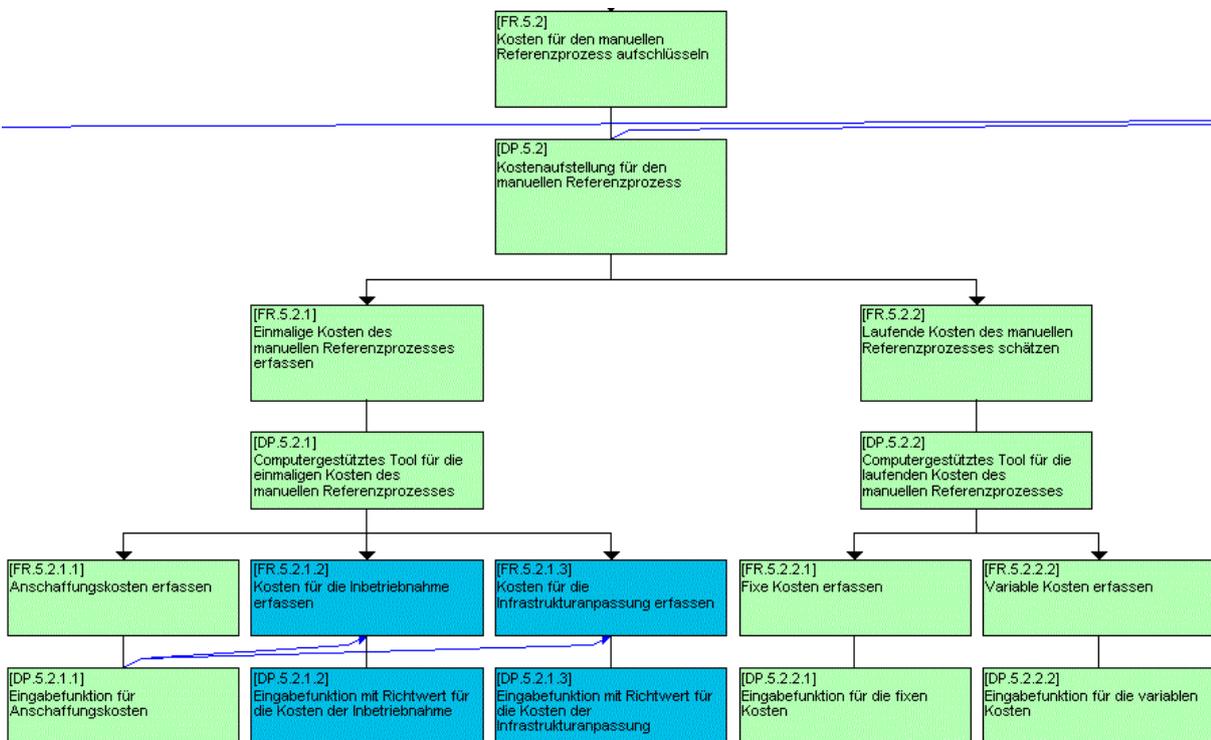


Abbildung B-16: FR_{52} - DP_{52} -Baum Gestaltungsfeld – Wirtschaftlichkeit

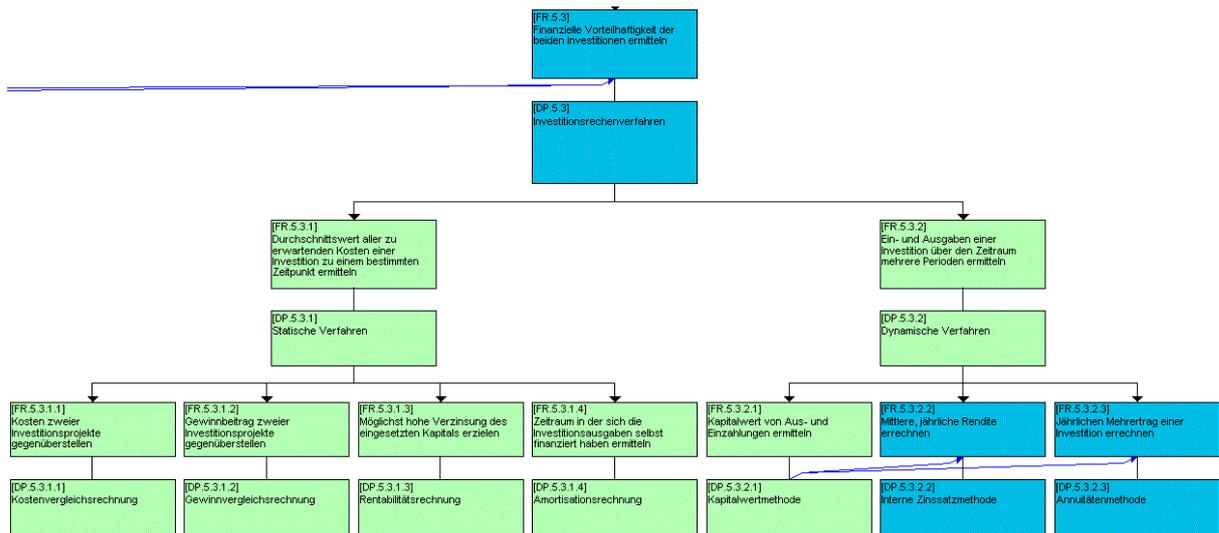
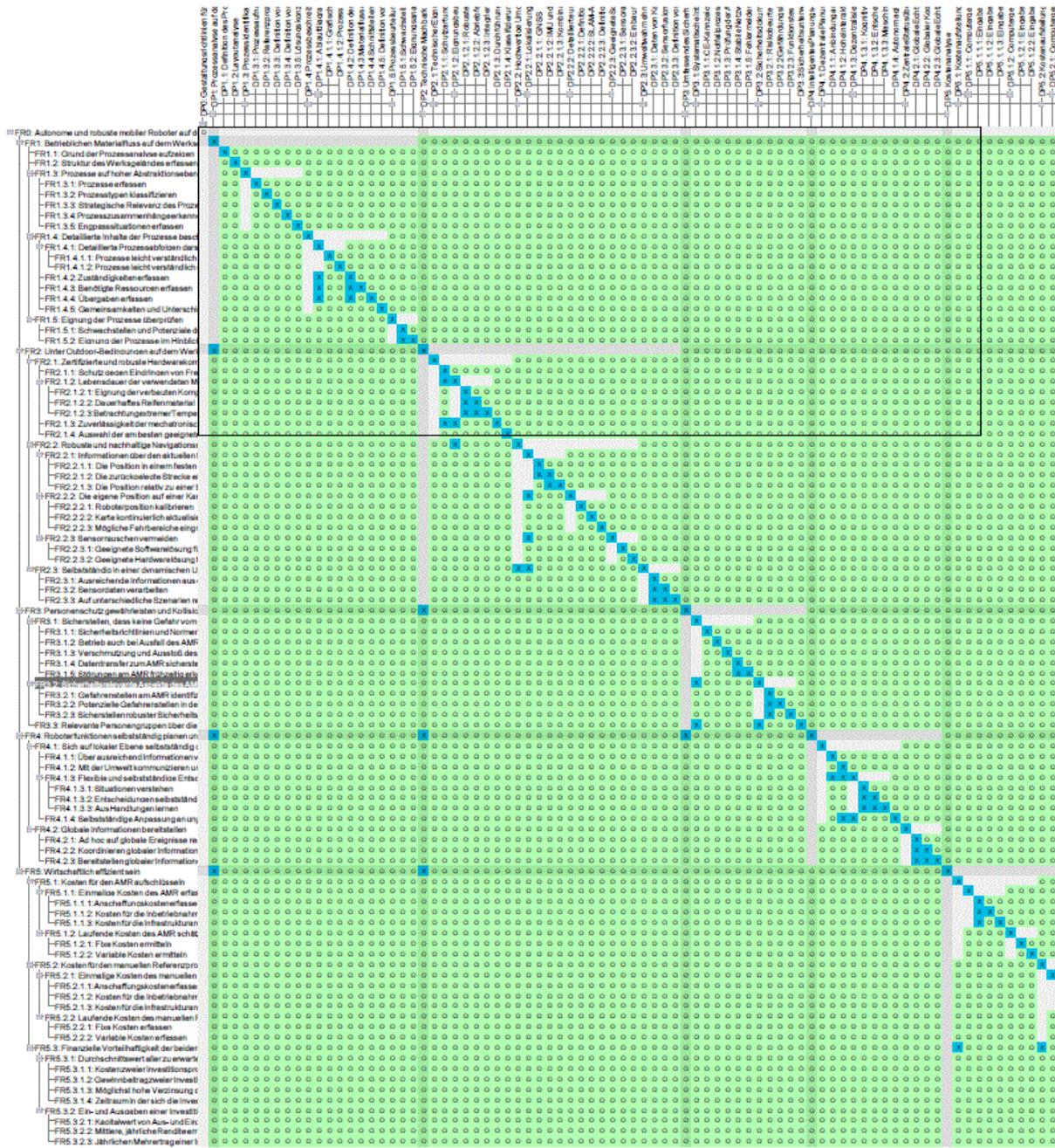


Abbildung B-17: FR_{53} - DP_{53} -Baum Gestaltungsfeld – Wirtschaftlichkeit

B.3 Gesamt Design Matrix



Anhang C Ergänzungen zu Kapitel 5: Umsetzung

C.1 Vorlagen der Checklisten

Tabelle C-1: Vorlage Checkliste – Technische Machbarkeitsprüfung

				Checkliste: Technische Machbarkeitsprüfung
Projekt:			Planungsschritt: 	
1. Technischer Eignungstest von Fahrzeugkomponenten für den Outdoor-Einsatz 			Verantwortlichkeit:	
1.1	Schutzart und Schutzklasse der Fahrzeugkomponenten			
	1.1.1	Robuste Fahrzeugkomponenten	<input type="checkbox"/>	
	1.1.2	Abriebfeste Bereifung	<input type="checkbox"/>	
	1.1.3	Integriertes Wärme- und Kühlsystem	<input type="checkbox"/>	
1.2	Eignungsbeurteilung verschiedener Materialien für den Outdoor-Einsatz			<input type="checkbox"/>
1.3	Durchführung von Dauertests			<input type="checkbox"/>
1.4	Klassifizierungsmodell von Fahrzeugkomponenten anhand von Leistungskriterien			<input type="checkbox"/>
2. Hochwertige Umgebungskarten mit robuster und akkurater Lokalisierung 			Verantwortlichkeit:	
2.1	Lokalisierungstechnologien			
	2.1.1	GNSS	<input type="checkbox"/>	
	2.1.2	IMU und Odometrie	<input type="checkbox"/>	
	2.1.3	Kombination von visuellen Sensoren mit Umgebungsobjekten	<input type="checkbox"/>	
2.2	Detaillierte und synchronisierte Karte			
	2.2.1	Definition von Rücksetzpositionen (Start- und Zielposition)	<input type="checkbox"/>	
	2.2.2	SLAM-Algorithmen	<input type="checkbox"/>	
	2.2.3	Definition von Fahr- und Sperrbereichen auf der Karte	<input type="checkbox"/>	
2.3	Geeignete Software- und Hardwarelösungen			
	2.3.1	Sensorauswertung mit geeigneten Algorithmen	<input type="checkbox"/>	
	2.3.2	Einbau redundanter Sensorik	<input type="checkbox"/>	
3. Umweltwahrnehmung und -verständnis durch Sensorik 			Verantwortlichkeit:	
3.1	Daten von Kameras und Laserscannern (2D/3D)			<input type="checkbox"/>
3.2	Sensorfusion			<input type="checkbox"/>
3.3	Definition von Reaktionsszenarien basierend auf der Umgebung			<input type="checkbox"/>

Tabelle C-2: Vorlage Checkliste – Umfassendes Sicherheitssystem

		Checkliste: Umfassendes Sicherheitssystem	
Projekt:		Planungsschritt: 	
1. Systematische Integration und Vernetzung von Sicherheitsmaßnahmen 		Verantwortlichkeit:	
1.1	CE-Kennzeichnung	<input type="checkbox"/>	
1.2	Notfallprozess/-strategie	<input type="checkbox"/>	
1.3	Prüfung der Anforderungen an den Umweltschutz	<input type="checkbox"/>	
1.4	Stabile Netzwerkverbindung	<input type="checkbox"/>	
1.5	Fehlermeldesystem	<input type="checkbox"/>	
2. Sicherheitsdokumentation 		Verantwortlichkeit:	
2.1	Risikobeurteilung	<input type="checkbox"/>	
2.2	Gefährdungsbeurteilung	<input type="checkbox"/>	
2.3	Funktionstests von Sicherheitseinrichtungen	<input type="checkbox"/>	
3. Sicherheitsunterweisung 		Verantwortlichkeit:	
3.1	Sicherheitsunterweisung	<input type="checkbox"/>	

Tabelle C-3: Vorlage Checkliste – Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem

		Checkliste: Intelligentes Planungs- und Steuerungssystem	
Projekt:		Planungsschritt: 	
1. Dezentrale Planung und Steuerung 		Verantwortlichkeit:	
1.1	Anbindung an Dateninfrastruktur	<input type="checkbox"/>	
1.2	Hohe Interaktion zwischen unabhängigen Systemelementen	<input type="checkbox"/>	
1.3	Dezentralisierte Entscheidungsfindung		
1.3.1	Kognitive Fähigkeiten	<input type="checkbox"/>	
1.3.2	Entscheidungsfähigkeit basierend auf KI	<input type="checkbox"/>	
1.3.3	Maschinelles Lernen	<input type="checkbox"/>	
1.4	Autonom agierendes System	<input type="checkbox"/>	
2. Zentrale Statusüberwachung 		Verantwortlichkeit:	
2.1	Globale Echt-Zeit-Informationen über die Umgebung sammeln	<input type="checkbox"/>	
2.2	Globaler Koordinator	<input type="checkbox"/>	
2.3	Globale Echt-Zeit-Informationen über die Umgebung übermitteln	<input type="checkbox"/>	

Tabelle C-4: Vorlage Checkliste – Kostenanalyse

Checkliste: Kostenanalyse			
Projekt:		Planungsschritt: 	
1. Kostenaufstellung AMR 		Verantwortlichkeit:	
1.1	Computergestütztes Tool für die einmaligen Kosten des AMR		
1.1.1	Eingabefunktion für Anschaffungskosten	<input type="checkbox"/>	
1.1.2	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Inbetriebnahme	<input type="checkbox"/>	
1.1.3	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Infrastrukturanpassung	<input type="checkbox"/>	
1.2	Computergestütztes Tool für die laufenden Kosten des AMR		
1.2.1	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die fixen Kosten	<input type="checkbox"/>	
1.2.2	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die variablen Kosten	<input type="checkbox"/>	
2. Kostenaufstellung manueller Referenzprozess 		Verantwortlichkeit:	
2.1	Computergestütztes Tool für die einmaligen Kosten des manuellen Referenzprozesses		
2.1.1	Eingabefunktion für Anschaffungskosten	<input type="checkbox"/>	
2.1.2	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Inbetriebnahme	<input type="checkbox"/>	
2.1.3	Eingabefunktion mit Richtwert für die Kosten der Infrastrukturanpassung	<input type="checkbox"/>	
2.2	Computergestütztes Tool für die laufenden Kosten des manuellen Referenzprozesses		
2.2.1	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die fixen Kosten	<input type="checkbox"/>	
2.2.2	Eingabefunktion mit Abschätzhilfe für die variablen Kosten	<input type="checkbox"/>	
3. Investitionsrechenverfahren 		Verantwortlichkeit:	
3.1	Statische Verfahren		
3.1.1	Kostenvergleichsrechnung	<input type="checkbox"/>	
3.1.2	Gewinnvergleichsrechnung	<input type="checkbox"/>	
3.1.3	Rentabilitätsrechnung	<input type="checkbox"/>	
3.1.4	Amortisationsrechnung	<input type="checkbox"/>	
3.2	Dynamische Verfahren		
3.2.1	Kapitalwertmethode	<input type="checkbox"/>	
3.2.2	Interne Zinssatzmethode	<input type="checkbox"/>	
3.2.3	Annuitätenmethode	<input type="checkbox"/>	

C.2 Kapitalwertmethode

Tabelle C-5: Berechnung des Kapitalwerts des manuellen Prozesses mit Elektroschlepper und des automatisieren Prozesses mit AMR

Variante 1: Manueller Prozess mit Elektroschlepper		0	1	2	3	4	5	6	7
Investitionsausgabe	$I_{\text{Var I}}$	25.000 €							
Fixkosten									
sonstige Fixkosten / Jahr		-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€
Summe Fixkosten		-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€
Variable Kosten									
Personalkosten		160.000 €	164.000 €	168.100 €	172.303 €	176.610 €	181.025 €	185.551 €	
Wartungskosten		10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €	10.000 €
Summe variable Kosten		170.000 €	174.000 €	178.100 €	182.303 €	186.610 €	191.025 €	195.551 €	
Gesamtkosten	$K_{\text{Var I}}$	170.000 €	174.000 €	178.100 €	182.303 €	186.610 €	191.025 €	195.551 €	
Variante 2: Automatisierter Prozess mit AMR		0	1	2	3	4	5	6	7
Investitionsausgabe	$I_{\text{Var II}}$	260.000 €							
Fixkosten									
sonstige Fixkosten / Jahr		35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €
Summe Fixkosten		35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €	35.000 €
Variable Kosten									
Personalkosten		-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€	-€
Wartungskosten		15.000 €	15.375 €	15.759 €	16.153 €	16.557 €	16.971 €	17.395 €	17.828 €
Summe variable Kosten		15.000 €	15.375 €	15.759 €	16.153 €	16.557 €	16.971 €	17.395 €	17.828 €
Gesamtkosten	$K_{\text{Var II}}$	50.000 €	50.375 €	50.759 €	51.153 €	51.557 €	51.971 €	52.395 €	52.828 €
Kapitalwertmethode		0	1	2	3	4	5	6	7
Investitionsausgabe Variante 2	$I_{\text{Var II}}$	260.000 €							
Investitionsausgabe Variante 1	$I_{\text{Var I}}$	25.000 €							
Gesamtkosten Variante 1	$K_{\text{Var I}}$	170.000 €	170.000 €	174.000 €	178.100 €	182.303 €	186.610 €	191.025 €	195.551 €
Gesamtkosten Variante 2	$K_{\text{Var II}}$	50.000 €	50.375 €	50.759 €	51.153 €	51.557 €	51.971 €	52.395 €	52.828 €
Kostendifferenz	$K_{\text{Var I}} - K_{\text{Var II}}$	120.000 €	123.625 €	127.341 €	131.149 €	135.053 €	139.039 €	143.130 €	147.323 €
Abzinsungsfaktor	$1/(1+i)^t$	1,00	0,74	0,55	0,41	0,30	0,22	0,17	0,12
Barwerte (abgezinste Kostendifferenz)	$B(t) = (K_{\text{Var I}} - K_{\text{Var II}}) / (1+i)^t$	88.889 €	67.833 €	51.757 €	39.485 €	30.119 €	23.039 €	17.620 €	13.271 €
kumulierte Barwerte		235.000 €	-146.111 €	-78.278 €	-26.522 €	12.963 €	43.082 €	66.121 €	83.741 €
Kapitalwert der Kostenersparnis	K_0								
		43.082 €							
Amortisationszeit (dynamisch)		0	1	2	3	4	5	6	7
Barwerte (abgezinste Kostendifferenz)	$B(t) = (K_{\text{Var I}} - K_{\text{Var II}}) / (1+i)^t$	88.889 €	67.833 €	51.757 €	39.485 €	30.119 €	23.039 €	17.620 €	13.271 €
kumulierte Barwerte		235.000 €	-146.111 €	-78.278 €	-26.522 €	12.963 €	43.082 €	66.121 €	83.741 €
Amortisationszeit	t_a								
		3,51							