

Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Automobil- montage mittels durchgängigem modularem Engineering

-Am Beispiel der Mensch-Roboter-Kooperation in
der Unterbodenmontage-

Dissertation
zur Erlangung des Grades
des Doktors der Ingenieurwissenschaften
der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät
der Universität des Saarlandes

von
Matthias Scholer

Saarbrücken

2018

Tag des Kolloquiums: 18.02.2019
Dekan: Prof. Dr. rer. nat. Guido Kickelbick
Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Müller
Prof. Dr.-Ing. Jörg Krüger
Prof. Dr.-Ing. Peter Plapper
Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre
Akademischer Mitarbeiter: Dr.-Ing. Paul Motzki

Kurzzusammenfassung / Abstract

Die Automobilindustrie steht vor Herausforderungen durch verkürzte Lebenszyklen, wachsende Vielfalt und schwankende Märkte. Hersteller benötigen eine anpassungsfähige Produktion mit intelligenter Kombination aus Automatisierung und Handarbeit. Neue Technologien wie cyber-physische Systeme (CPS) und Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) bieten sich als Lösungen an. Aufgrund hoher Komplexität und anwendungsspezifischer Lösungen ist die Umsetzung aufwendig und schränkt Wiederverwendbarkeit und Anwendungsbereich ein.

Ziel der Arbeit ist es, das Potenzial angepasster Automatisierung zu nutzen, um Produktivität und Qualität zu verbessern und Wandlungsfähigkeit sicherzustellen. Die entwickelte Methodik beschreibt einen durchgängigen Prozess von der Montageplanung bis zur technischen Realisierung. Ein einheitliches Datenmodell ermöglicht die Zuordnung von Prozessanforderungen zu ausführbaren Ressourcenmethoden, die aus einem modularen System konfiguriert sind. Diese Ressourcen sind als physische und cyber Komponenten integriert, was einfache Rekonfiguration ermöglicht. Die Beschreibung der Arbeitsaufgaben des Systems als Workflow Liste ermöglicht eine flexible Prozessanpassung. Aufwendige Programmierung wird durch Parametrierung von wiederverwendbaren Modulen in Kombination mit angepasster Aufgabenbeschreibung ersetzt. In der Praxis zielt die Methodik darauf ab, kürzere Planungszeiten zu erreichen sowie den Einsatz von CPS in der angepasst automatisierten Montage zu erleichtern.

Today's automotive manufacturers require a production line with a customised combination of automation and manual labour to combat ever shortening product lifecycles and differentiating market demands. New technologies such as cyber-physical systems and human-robot collaboration emerge as solutions to such requirement. However, the application of each customised design is complex and specific. The significant effort required in each application limits the scope and reusability of such application. A consistent cross-disciplinary planning methodology is therefore needed to maximise the potential of such customisation and to improve productivity and quality whilst maintaining flexibility and versatility.

This thesis develops such methodology and describes an integrated process from assembly planning to its implementation. A modular system is used where a uniform data model allows different assignment of process requirements for different executable methods of resources. These resources are integrated as physical and cyber components, allowing easy reconfiguration. The system's work tasks are a workflow-based list allowing a flexible adaptation of process steps. Significant programming efforts are replaced by parameterisation of reusable modules in combination with an adaptable task description. Upon implementation, shorter planning periods as well as easier use of HRC and CPS in customised automated assembly are achieved due to higher consistency and reusability.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) in Saarbrücken.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Rainer Müller, der mir diese Arbeit ermöglicht hat. Durch seine fachliche Unterstützung und Förderung sowie konstruktive Diskussionen wurde mir ein optimales Arbeitsumfeld gegeben und ich konnte mir das benötigte Wissen zur Erstellung dieser Arbeit aneignen.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Krüger für die Übernahme des Zweitgutachtens, das inhaltliche Interesse, die eingebrachte fachliche Expertise und die konstruktiven Hinweise bei der Durchsicht dieser Arbeit.

Des Weiteren danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Peter Plapper für die Übernahme des dritten Gutachtens.

Ich danke ebenso meinem wissenschaftlichen Begleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre für seine Unterstützung während meiner Promotionszeit durch fachliche Diskussionen und regelmäßige Treffen.

Die Forschungsarbeiten, welche dieser Arbeit zugrunde liegen, wurden innerhalb des vom europäischen Fonds für regionale Entwicklung geförderten Forschungsprojektes AutoIBN durchgeführt. Ich danke meinen Kollegen Marcel Otto, Christian Siegwart, Benjamin Illmer und Pascal Stoffels für die gute Zusammenarbeit und die fachliche Unterstützung.

Meinen Kollegen des ZeMAs insbesondere der Gruppe Montageverfahren und -automatisierung danke ich für den intensiven Austausch und die kollegiale und freundschaftliche Arbeitsatmosphäre. Explizit danke ich Leonie Schirmer, Martin Karkowski und Lennard Margies für die Durchsicht der Arbeit und die inhaltlichen Diskussionen. Auch danke ich allen öffentlichen und industriellen Forschungspartnern des ZeMAs für die gute Zusammenarbeit in zahlreichen Projekten und den tiefen praktischen Einblick.

Besonderen Dank und Wertschätzung möchte ich meinen studentischen Mitarbeitern ausdrücken, welche mich bei den Forschungs- und Industrieprojekten maßgeblich unterstützt und während der Zeit am ZeMA begleitet haben. Durch ihr herausragendes Engagement und Begeisterung für die Arbeitsaufgaben wurde diese Arbeit ermöglicht. Insbesondere möchte ich mich neben meinen heutigen Kollegen Martin Karkowski und Lennard Margies bei Valerij Dino und Matthias Blum bedanken.

Außerdem möchte ich meiner Partnerin und meiner Familie für den Rückhalt und die motivierende Unterstützung sowie das Engagement bei der Durchsicht des Manuskriptes danken.

Inhaltsverzeichnis

Content

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	IV
Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis.....	VII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation und Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs.....	5
2.1 Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Montage	5
2.1.1 Begrifflichkeiten und Leitgedanken	5
2.1.2 Prinzipien zur Aufgabenteilung.....	8
2.2 Systemanalyse und -entwurf	10
2.2.1 Anforderungsdefinition und Ableitung von Verantwortlichkeiten	10
2.2.2 Vorgehensmodelle zur Systemanalyse und -entwurf	12
2.2.3 Mechatronische Modularisierung von Montageanlagen	23
2.3 Modulare und objektorientierte Anlagensteuerung.....	27
2.3.1 Relevante Systemarchitekturen	27
2.3.2 Konzepte zur Anlagenmodellierung und -steuerung	33
2.4 Fazit	37
3 Bestehende Forschungsansätze und Applikationen.....	39
3.1 Ansätze in der Montage- /Anlagenplanung und Integration.....	39
3.1.1 Überblick über bestehende Forschungsansätze	39
3.1.2 Praktische Umsetzung modularisierter Anlagenkonzepte	51
3.2 Mensch-Roboter-Kooperation in der Automobilproduktion.....	51
3.2.1 Übersicht Automobilmontage und Nutzung der Robotik.....	52
3.2.2 Ziele und Arten der MRK in der Automobilindustrie	53
3.2.3 Bestehende Applikationen und Forschungsansätze in der automobilen Fließmontage.....	55
3.3 Fazit und Entwicklungsbedarf	57
4 Konzeption der Methodik.....	59
4.1 Ableitung der Anforderungen	59
4.2 Einordnung und Vorgehensweise	61
5 Vorgehen zum Systementwurf	64
5.1 Entwicklung eines durchgängigen Vorgehensmodells	64

5.2	Definition der relevanten (Teil-)Produktmerkmale	67
5.3	Durchführung des Systementwurfs	70
5.3.1	Beschreibung der Verantwortlichkeiten	70
5.3.2	Erstellung des lösungsneutralen Systementwurfs	71
5.4	Vorgehensweise zur Prozessplanung	72
5.4.1	Beschreibung des Montageprozesses	72
5.4.2	Zuteilung der Verantwortlichkeiten und Arbeitsraumplanung	73
5.4.3	Ablaufplanung und Gesamtprozessbeschreibung	75
5.5	Zusammenfassung	76
6	Konzept modularer Konfiguration und Integration	78
6.1	Ablauf der Konfiguration und Integration	78
6.2	Aufbau und Inhalt der Work List	80
6.3	Definition des Modularisierungskonzeptes	81
6.3.1	Beschreibungssystematik der Module	82
6.3.2	Aufbau und Bestandteile des modularen Baukastens	84
6.4	Konfiguration der Module	85
6.4.1	Ablauf des Konfigurationsprozesses	85
6.4.2	Vorgehensweise zur Bestimmung der Modulausprägung	86
6.4.3	Festlegung der finalen Konfiguration	88
6.5	Integration der Module	89
6.5.1	Ablauf des Integrationsprozesses	89
6.5.2	Steuerungstechnische Abbildung der Anlagentopologie	90
6.6	Systemelemente zur Planung und Prozessausführung	92
6.6.1	Konzeption und Spezifikation der Systemelemente	92
6.6.2	Configuration and Reconfiguration User Interface	94
6.6.3	Steuerungskonzept zur Modulintegration und Prozessausführung	101
6.6.4	Datenhaltung, Schnittstellen und Datenaustausch	108
6.7	Zusammenfassung	115
7	Validierung anhand der MRK Unterbodenmontage	117
7.1	Validierungsszenario	117
7.1.1	Vorgehen zur Auswahl eines geeigneten Prozesses	117
7.1.2	Beschreibung der aktuellen Produktionssituation	118
7.1.3	Ableiten von Optimierungspotenzial	119
7.1.4	Bestimmung der relevanten Grobplanungsdaten	122
7.2	Produktmerkmalsanalyse	123
7.2.1	Produktmerkmalsanalyse der relevanten Komponenten	123
7.2.2	Bestimmung der prozessrelevanten Hauptmerkmale	125
7.3	Systementwurf eines optimierten Gesamtprozesses	127
7.3.1	Definition und Beschreibung der Verantwortlichkeiten	127
7.3.2	Prozessplanung	128

7.3.3	Erstellung der Work List	134
7.3.4	Festlegung der benötigten Modulklassen und techn. Parameter	137
7.4	Technische Realisierung	139
7.4.1	Bestimmung der technischen Lösungsmöglichkeiten.....	139
7.4.2	Festlegung der finalen Konfiguration.....	147
7.4.3	Gesamtprozessablauf mit der gewählten Umsetzung	149
7.5	Integration	152
7.5.1	Physische Integration als modularer Montageassistent	153
7.5.2	Steuerungstechnische Integration.....	155
7.5.3	Umsetzung der Prozessführung.....	159
7.6	Erprobung im Gesamtsystem	161
7.6.1	Gesamtaufbau in der Demonstratorfabrik	161
7.6.2	Validierung des Prozessablaufs	162
7.7	Zusammenfassung und Bewertung der Validierung.....	163
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	167
9	Literaturverzeichnis.....	171
Anhang	183
I.	Klassendiagramme und Befehlsaufrufe.....	183
II.	Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	186
III.	Flowchart Gesamtprozess.....	188
IV.	Ergonomiebewertungen nach REBA und Leitmerkmalmethode	189
V.	Zugehörige studentische Arbeiten.....	194

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit und Unterteilung der Kapitel.....	3
Abbildung 2.1: Übersicht über die primären Wandlungsbefähiger	6
Abbildung 2.2: Aufteilung und Inhalt der Domänen im Axiomatic Design	13
Abbildung 2.3: V-Modell des Entwicklungszyklus im Axiomatic Design.....	13
Abbildung 2.4: Problemlösungszyklus und V-Modell der VDI 2206	15
Abbildung 2.5: Vorgehensweise in der Entwicklungsmethodik	17
Abbildung 2.6: Vergleich der Vorgehensmodelle	22
Abbildung 2.7: Aufbau eines modularen Systems und Systemstruktur	25
Abbildung 2.8: modulare Systemstruktur	26
Abbildung 2.9: Agentensystem nach	28
Abbildung 2.10: Aufbau der Servicebasierte Architektur	30
Abbildung 2.11: Broker Architektur	31
Abbildung 2.12: Bewertung der Softwarearchitekturen.....	31
Abbildung 2.13: UML-Darstellungsbeispiel.....	34
Abbildung 2.14: Struktur der RoleClassLibrary in AutomationML	36
Abbildung 3.1: Problemmodell des Engineeringprozesses.....	46
Abbildung 3.2: Abgleich der Forschungsansätze mit der Zielsetzung der Arbeit	50
Abbildung 3.3: Gliederung der Automobilproduktion	52
Abbildung 3.4: Umgesetzte MRK-Applikationen und Robotereinsatz	53
Abbildung 3.5: Gliederung der MRK-Einsatzbereiche in der Automobilproduktion ...	53
Abbildung 3.6: Bestehende MRK-Applikationen in der Fließmontage	55
Abbildung 3.7: Bewerteter Vergleich der existierenden Ansätze	57
Abbildung 4.1: Ableitung der Anforderungen	59
Abbildung 4.2: Ebenen und Systemhierarchie eines Unternehmens.....	61
Abbildung 4.3: Vorgehensweise zur Entwicklung der Methodik.....	62
Abbildung 5.1: Vorgehensmodell zur Planung einer Montagestation	64
Abbildung 5.2: Strukturstückliste und Strukturbaum am Beispiel der Radmontage ..	68
Abbildung 5.3: Strukturbaum und erweiterte Strukturstückliste	69
Abbildung 5.4: Funktionsbaum / hierarchische Aufgabenanalyse	71
Abbildung 5.5: Operationsreihenfolge mit Merkmalsbeschreibung.....	73
Abbildung 5.6: Beschreibung und Zuordnung der Verantwortlichkeiten	74
Abbildung 5.7: Aufteilung des Arbeitsraums in der Prozessstation.....	75
Abbildung 5.8: Zeitlicher Ablauf in der Prozessstation.....	76
Abbildung 6.1: Ablauf des Konfigurations- und Integrationsprozesses.....	78
Abbildung 6.2: Beschreibungssystematik der Module	82
Abbildung 6.3: Modulklasse Robot System	83
Abbildung 6.4: Bestandteile des modularen Baukastens.....	84
Abbildung 6.5: Ablauf des Konfigurationsprozesses.....	86
Abbildung 6.6: Auswahl der Modulausprägung	87
Abbildung 6.7: Struktur der Anlagentopologie innerhalb der Steuerung	91
Abbildung 6.8: Systemelemente und Aufgaben.....	94

Abbildung 6.9: Hauptfunktionen des CoRe-UI.....	94
Abbildung 6.10: Aufteilung der Funktionalitäten innerhalb Software.....	95
Abbildung 6.11: Erstellung einer Work List.....	96
Abbildung 6.12: Ablauf der Modulkonfiguration	98
Abbildung 6.13: Inbetriebnahme und Test Funktionen des CoRe-UI.....	99
Abbildung 6.14: Prozessübersicht und -Interaktion im CoRe-UI.....	100
Abbildung 6.15: Work List und Job Klasse	101
Abbildung 6.16: Modul Datenbaustein	102
Abbildung 6.17: Aufbau und Elemente des Steuerungskonzeptes	102
Abbildung 6.18: Workcell und Task Controller Klasse	103
Abbildung 6.19: Work List Handler	103
Abbildung 6.20: Ablauf der Work List Ausführung	106
Abbildung 6.21: Hinzufügen eines Jobs zum Endeffektor	107
Abbildung 6.22: Ausführung eines Jobs durch den Endeffektor	107
Abbildung 6.23: Austausch von Daten innerhalb des CoRe-UI	109
Abbildung 6.24: Modulausprägung in der Datenbank und generiertes Datenobjekt	110
Abbildung 6.25: Datenschnittstellen innerhalb des CoRe-UI	112
Abbildung 6.26: Eingabe der Koordinaten bei den Job-Properties	115
Abbildung 7.1: Bauteile der Unterbodenmontage und Verortung der Prozesse	118
Abbildung 7.2: Montageprozess der Unterbodenverkleidung	119
Abbildung 7.3: Die einzelnen Prozessschritte mit ergonomischer Belastung	120
Abbildung 7.4: Ausschnitt aus der Ergonomiebewertung mit LMM und REBA.....	121
Abbildung 7.5: Übersicht der Verkleidungsteile am Fahrzeugunterboden	124
Abbildung 7.6: Unterbodenverkleidung des Motors mit Schraubpunkten	124
Abbildung 7.7: Fügemitel und Schraubverbindung der Unterbodenverkleidung	125
Abbildung 7.8: Strukturstückliste und der Strukturbaum der UBV-Motor	126
Abbildung 7.9: Anbindungspunkte der UBV am Fahrzeugunterboden	126
Abbildung 7.10: Erweiterte Strukturstückliste	127
Abbildung 7.11: Funktionsbaum mit Verantwortlichkeitsstruktur.....	127
Abbildung 7.12: Operationsreihenfolge mit Merkmalen	128
Abbildung 7.13: Aufgabenteilung zwischen Mensch und automatisiertem System	129
Abbildung 7.14: Verantwortlichkeitsstruktur mit Aufgabenzuordnung.....	130
Abbildung 7.15: Operationsreihenfolge der Unterbodenverschraubung	131
Abbildung 7.16: Verbesserungspotenziale durch optimierten Prozess.....	131
Abbildung 7.17 Ergebnis der LMM vor und nach der Optimierung	132
Abbildung 7.18: Aufteilung des Arbeitsraumes	133
Abbildung 7.19: Ablauf und Unterteilung der Work List	135
Abbildung 7.20: Erstellung der Work List mit dem CoRe-UI	135
Abbildung 7.21: Aufbau und Bestandteile der Sub List MoveList	136
Abbildung 7.22: Benötigter Arbeitsraum des Roboters.....	138
Abbildung 7.23: Übersicht der benötigten Modulklassen	139
Abbildung 7.24: Konfiguration des Robot System	140
Abbildung 7.25: Bildverarbeitungsalgorithmus zur Verschraubungsdetektion	141

Abbildung 7.26: Endeffektor mit Werkzeug und angebrachter Sensorik.....	142
Abbildung 7.27: Schraubenzuführeinheit mit Magazin.....	142
Abbildung 7.28: Aufbau der Transporteinheit und Schwenkbewegung	144
Abbildung 7.29: Ausgleichseinheit und Kopplungsmechanismus	145
Abbildung 7.30: Anbindung der Prozesseinheit an das Fahrzeug	145
Abbildung 7.31: Prinzip zur Synchronisation und Drehzahlregelung des Antriebes	146
Abbildung 7.32: Konfigurierte Modulausprägungen.....	147
Abbildung 7.33: zweistufige Simulation des Prozesses.....	148
Abbildung 7.34: Investitionsrechnung zur wirtschaftlichen Bewertung	148
Abbildung 7.35: Ablauf des Gesamtprozesses und die Aufgabenteilung	150
Abbildung 7.36: Sicherheitskonzept und Sicherheitsbereiche	152
Abbildung 7.37: Transportsystem und Anbindung der Prozesseinheit	153
Abbildung 7.38: Medienflansch mit Anschlüssen.....	154
Abbildung 7.39: Prozesseinheit mit ihren Komponenten	155
Abbildung 7.40: Aufruf der Funktion zur Bausteingenerierung	156
Abbildung 7.41: Struktur der Anbindung der einzelnen Komponenten	157
Abbildung 7.42: Umsetzung der Prozessführung im CoRe-UI.....	160
Abbildung 7.43: Gesamtaufbau der Demonstratorfabrik.....	161
Abbildung 7.44: Prozessstation der Unterbodenmontage	162
Abbildung 7.45: Validierungsstufen des Prozessablaufs	162

Formelzeichen und Abkürzungsverzeichnis

Formula Symbols and Abbreviations

BAuA	Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
CoRe-UI	Configuration and Reconfiguration User Interface
CPPS	Cyber-physisches Produktions System
CPS	Cyber-physische Systeme
DP	Design Parameter
EFTC	End Effector Task Controller
FA	Funktionale Anforderung
LMM	Leitmerkmalmethode
MAS	Multiagentensystem
MRK	Mensch-Roboter-Kooperation
MTM	Methods-Time Measurement
OEM	Original Equipment Manufacturer
OOA	Objektorientierte Analyse
REBA	Rapid Entire Body Assessment
SOA	Serviceorientierte Architektur
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
UML	Unified Modeling Language
WCTC	Work Cell Task Controller

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

In den letzten Jahrzehnten hat sich die Automobilindustrie von der reinen Massenproduktion zur kundenindividuellen Produktion gewandelt, um den Kundenwünschen nach individualisierten Fahrzeugen und einer breiten Modellpalette nachzukommen. Neue Modelle oder Produkthanpassungen werden in immer kürzeren Abständen auf den Markt gebracht, gleichzeitig gibt es aufgrund globaler Märkte und Einflüsse hohe Nachfrageschwankungen. Eine zusätzliche Herausforderung ist die zunehmende Anzahl an Fahrerassistenz- und Komfortsystemen sowie alternative Antriebe wie Hybrid- oder Elektroantriebe. Innerhalb der Produktion ist die Montage als letzte Stufe im Produktentstehungsprozess besonders von diesen Einflussfaktoren betroffen, da hier das komplette Variantenspektrum abgedeckt wird und auf Änderungen und Kapazitätsanpassungen besonders schnell reagiert werden muss. Aufgrund dieser Umgebungsbedingungen erfordern die Montage- und Inbetriebnahmeprozesse im Automobilbau zu meist ein hohes Maß an Wahrnehmungsvermögen, Geschicklichkeit und logischem Denken und können bisher überwiegend nur manuell durchgeführt werden. Um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können, müssen die Unternehmen ihre Produktivität und das Qualitätsniveau stetig steigern. Die manuellen Prozesse stoßen dabei hinsichtlich der zu beherrschenden Komplexität, der Ergonomie und den steigenden Qualitätsanforderungen an ihre Grenzen. [BLE04; HUB16, S. 1; KRÜ09; MIC10; STE14, S. 103]

Eine reine Erhöhung des Automatisierungsgrades ist aufgrund des beschriebenen turbulenten Umfeldes jedoch nicht geeignet, um Verbesserungen zu erreichen. Zahlreiche Unternehmen, die in hochautomatisierte Anlagen investierten, haben festgestellt, dass diese Lösungen nicht anpassungsfähig genug sind und zusätzlich hohe technische Herausforderungen aufweisen. [BLE04; LAY00]

Die Automobilhersteller wünschen sich daher eine wandlungsfähige Produktion mit einer intelligenten, angepassten Kombination aus automatisierten Anlagen und manuellen Tätigkeiten. Im Zuge der sogenannten vierten industriellen Revolution kommen neue Technologien wie cyber-physische Systeme (CPS) oder Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) auf. Diese werden als Schlüsseltechnologien angesehen, um Aufgaben in der Montage fähigkeitsbasiert zwischen Mensch und Maschine aufzuteilen und den Mitarbeiter zu unterstützen. Ziel sind effizientere und ergonomischere Prozesse mit verbesserter Produktqualität durch Nutzung der jeweiligen Vorteile von Menschen und automatisierten Systemen. Die smarte Produktionstechnik kann bisher in der Breite jedoch noch nicht effektiv eingesetzt werden. Hauptgrund ist die vielfach hohe Komplexität dieser Systeme. Bei neuen Anlagen oder Änderungen des Produktionsprozesses, beispielsweise aufgrund neuer Fahrzeuge oder Varianten, sind Veränderungen an Betriebsmitteln, oder der Anlagensoftware nötig. Diese Anpassungen müssen bisher aufwendig und individuell von Spezialisten durchgeführt und programmiert

werden. Eine Einbindung in den standardisierten Anlagenplanungsprozess und herkömmliche Automatisierungssoftware ist bisher nur unzureichend erfolgt. Dies sorgt für einen hohen Integrationsaufwand und schränkt die Wandlungsfähigkeit und Wiederverwendbarkeit der Systeme und Anlagen ein. Der Einsatzbereich beschränkt sich daher momentan auf ausgewählte Anwendungen und die erhofften Vorteile können nicht vollumfänglich genutzt werden. [BEN16; HUB16, S. 3, 267-268; KRÜ09; KRÜ17; STE14, S. 110–113]

1.2 Zielsetzung

Um die Vorteile smarter Produktionstechnologien besser nutzen zu können, ist ein disziplinübergreifender Ansatz erforderlich. Eine Zusammenführung der produktionstechnischen Vorgehensweise mit den Methoden aus der Mechatronik und Informatik soll eine gleichsinnige physische Anlagenplanung und steuerungstechnische Integration ermöglichen.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer durchgängigen Methodik zur Planung, Implementierung und Durchführung angepasst automatisierter und wandlungsfähiger Montageprozesse in der Automobilmontage.

Die Methodik soll genutzt werden, um eine Planung und den Systementwurf sowie die folgende technische Realisierung einer Montageanlage durchzuführen. Bisherige Nachteile bei der Wandlungsfähigkeit und Wiederverwendbarkeit sollen durch ein Vorgehensmodell unter Nutzung eines modularen, objektorientierten Konfigurations- und Integrationskonzeptes behoben werden. Aufwendige Programmierumfänge sollen hierbei großteils durch eine Modulparametrierung in Kombination mit einer angepassten Aufgabenbeschreibung ersetzt werden.

In der Anwendung soll durch die Methodik eine kürzere Planungsdauer mittels Durchgängigkeit und Wiederverwendbarkeit, sowie die einfachere Nutzung cyber-physischer Systeme und der Mensch-Roboter-Kooperation in der Automobilmontage erreicht werden. Um eine praktische Umsetzung zu ermöglichen, sollen der Planungsprozess und der Betrieb der Anlage durch eine Softwarelösung unterstützt werden und somit eine einfache und anpassungsfähige Zusammenarbeit von Mensch und automatisiertem System ermöglichen. Die Praxistauglichkeit soll in einem realitätsnahen Validierungsszenario nachgewiesen werden.

Zusammenfassend wird die übergeordnete Forschungsfrage abgeleitet:

Wie kann das Potenzial angepasster Automatisierungsprozesse in der Automobilmontage nutzbar gemacht werden, um die Produktivität und Qualität zu steigern und ebenso die nötige Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zu gewährleisten?

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Vorgehensweise zum Erreichen der Zielsetzung kann in acht Schritten dargestellt werden. Die Gliederung der Arbeit in die einzelnen Kapitel ist in Abbildung 1.1 dargestellt.



Abbildung 1.1: Aufbau der Arbeit und Unterteilung der Kapitel

Zur Erstellung einer angewandten Forschungsarbeit wird innerhalb der Einleitung zunächst die praktische Problemstellung beschrieben und eine Zielsetzung definiert.

In Kapitel 2 werden die relevanten Grundlagen des Betrachtungsbereichs der Arbeit dargestellt. Beginnend wird der Begriff der Wandlungsfähigkeit definiert und die wesentlichen Wandlungsbefähiger beschrieben. Ebenso wird der Begriff angepasste Automation eingeführt und die Prinzipien zur Aufgabenteilung zwischen Mensch und Automatisierungssystemen vorgestellt. Der zweite Teil des Grundlagenkapitels befasst sich mit der Vorgehensweise zur Anforderungsdefinition, der Systemanalyse und des Systementwurfs sowie der Modularisierung von Montageanlagen. Hierzu werden relevante Methoden und Vorgehensmodelle erläutert und verglichen. Im letzten Teil des Kapitels wird ein Überblick über modulare und objektorientierte Methoden zur Anlagensteuerung gegeben und abschließend ein Fazit gezogen.

In Kapitel 3 werden zunächst relevante Forschungsansätze und bestehende praktische Applikationen im Themenfeld dieser Arbeit beschrieben, verglichen und bewertet. Im zweiten Teil werden die Arten und Ziele der Mensch-Roboter-Kooperation in der Automobilmontage gezeigt und anhand relevanter Beispiele illustriert. Am Ende des Kapitels wird ein Fazit gezogen. Es werden bestehenden Lücken in den existierenden Ansätzen definiert, anhand derer dann eine Ableitung des Handlungsbedarfs durchgeführt wird.

Basierend auf der Forschungsfrage und dem beschriebenen Handlungsbedarf werden in Kapitel 4 Anforderungen an die Methodik abgeleitet. Wesentlich ist die Anwendbarkeit bei der Planung und technischen Realisierung hybrider Prozesse in der Automobilmontage. Zusätzlich sollen bei der Gestaltung und der späteren Prozessausführung die wichtigsten Wandlungsbefähiger berücksichtigt werden.

Anhand dieser Anforderungen wird dann die Vorgehensweise der Methodik abgeleitet und eine Einordnung in den Montageplanungsprozess und die Ebenen der Fabrikplanung vorgenommen. Die Methodik enthält alle Teilschritte von der Anforderungsdefinition über den Systementwurf hin zur technischen Realisierung. Ein durchgängiger Planungsprozess ausgehend von einer Analyse des zu montierenden Produktes über

die Gestaltung des Montageprozesses hin zur Auswahl und Implementierung der Betriebsmittel mit der anschließenden Ausführung und Steuerung des Prozesses wird dargestellt.

Anhand des so erarbeiteten, methodischen Konzeptes wird in Kapitel 5 ein Vorgehensmodell entwickelt. Ausgehend von einem grob geplanten Prozess werden die wichtigsten Anforderungen und Merkmale an den Systementwurf und die spätere technische Umsetzung ermittelt. Mithilfe dieser Anforderungen wird eine lösungsneutrale Beschreibung des Systementwurfs durchgeführt und die benötigten Verantwortlichkeiten definiert. Im Anschluss wird ermittelt wie darauf aufbauend ein Prozessablauf gestaltet wird und die Einzelaufgaben Mensch oder automatisiertem System zugeordnet werden.

In Kapitel 6 wird das Vorgehen zur Konfiguration und Integration des Anlagenentwurfs detailliert beschrieben. Die zuvor dem automatisierten System zugeordneten Arbeitsaufgaben werden in einer ablaufbasierten Work List systematisch und in einer für Mensch und Maschine verständlichen Form ausgedrückt. Um eine Zuordnung der Verantwortlichkeiten des geplanten Prozesses in der Work List zu den ausführbaren Methoden der Betriebsmittel zu erlauben, wird ein einheitliches Datenmodell und ein Modularisierungskonzept aufgebaut. Die darin vorhandenen Module werden gemäß der Verantwortlichkeit, welche sie innerhalb der Montageanlage erfüllen in Modulklassen geclustert. Die Klassen werden in einem Baukasten zusammengestellt und können entsprechend ihrer verfügbaren Methoden zur Ausführung einer Operation ausgewählt werden. Die technische Realisierung erfolgt durch die Auswahl einer Modulausprägung innerhalb der Klasse, welche in der Lage ist sowohl die Verantwortlichkeit als auch die technischen Anforderungen zu erfüllen. Zur praktischen Nutzung der Methodik wird ein Softwaresystem und ein Steuerungskonzept umgesetzt, um die Konfiguration und Inbetriebnahme softwaretechnisch zu unterstützen und den Prozessablauf in einer einheitlichen Steuerungsarchitektur durchzuführen.

Die praktische Validierung erfolgt in Kapitel 7 anhand der Montage einer Unterbodenverkleidung eines Fahrzeuges. Die Methodik wird in ihrer Gesamtheit angewandt. Ausgehend von der Analyse werden ein Montageprozess und die zugehörige Montageanlage entwickelt und in einem praktischen Aufbau in der Demonstratorfabrik dargestellt. Innerhalb der Validierung wird der Nachweis erbracht, dass die Methodik eine Durchgängigkeit vom Planungsprozess zur technischen Umsetzung ermöglicht und eine angepasst automatisierte und wandlungsfähige und Montageanlage umgesetzt werden kann.

Basierend auf den Ergebnissen wird in Kapitel 8 ein Fazit gezogen und ein Ausblick auf weiteren Forschungs- und Entwicklungsbedarf gegeben.

2 Grundlagen des Betrachtungsbereichs

In diesem Kapitel soll ein Verständnis für den Betrachtungsbereich geschaffen werden. Hierzu werden relevante Begriffe definiert und in den Kontext dieser Arbeit gesetzt. Ebenso werden relevante Methoden, Richtlinien und Vorgehensmodelle eingeführt und verglichen. In Kapitel 2.1 wird der Begriff der Wandlungsfähigkeit beschrieben und wesentliche Wandlungsbefähiger definiert. Ebenso wird das Grundprinzip der angepassten Automation und die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Automatisierungssystem beschrieben. In Kapitel 2.2 wird die Vorgehensweise zur Systemanalyse und -entwurf, sowie Modularisierung als Grundlage für die Planung und Umsetzung eines Montageprozesses anhand relevanter Methoden und Vorgehensmodelle erläutert. In Kapitel 2.3 wird abschließend ein Überblick über modulare und objektorientierte Methoden zur Anlagensteuerung gegeben.

2.1 Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Montage

2.1.1 Begrifflichkeiten und Leitgedanken

Wandlungsfähigkeit

Zur Definition des Begriffes Wandlungsfähigkeit erfolgt zunächst eine Abgrenzung zum Begriff Flexibilität. „Die Flexibilität beschreibt die Fähigkeit eines Produktionssystems, sich schnell an geänderte Einflussfaktoren anzupassen. Die Veränderungen, d. h. die möglichen erreichbaren Systemzustände, sind im Kontext der Flexibilität durch vorgehaltene Maßnahmenbündel definiert und durch zum Zeitpunkt der Planung festgelegte Fähigkeitskorridore begrenzt, d. h. beispielsweise, dass innerhalb dieser Korridore in einem vorab festgelegten Ausmaß eine Stückzahlveränderung aufgefangen werden kann.“ [NYH08, S. 24].

Skalierbarkeit und Modularität ermöglichen die Flexibilität einer Montageanlage. Skalierbarkeit bezeichnet hierbei eine Anpassung an eine Stückzahlveränderung. Modularität kennzeichnet im Kontext der Flexibilität die Möglichkeit des vorgesehenen Austauschs eines Montagemoduls. Beispielsweise der geplante Aus- und Rückbau eines Montagesystems durch Austausch manueller mit automatisierten Stationen infolge steigender oder abnehmender Stückzahlen während des Produktlebenszyklus [EIL15, S. 21; KLU09; MUE14].

Wandlungsfähigkeit bezeichnet das Potenzial, auch jenseits der festgelegten Korridore, auf unvorhersehbare Änderungen zu reagieren [NYH08, S. 24]. Aus diesem Grund weisen wandlungsfähige Systeme bei ihrer Implementierung keine ausdrücklichen Grenzen auf und sind weitestgehend lösungsneutral; sie können mit geringem Aufwand an Veränderungen angepasst werden [MUE11a; NYH08, S. 24].

Um ein wandlungsfähiges Montagesystem zu erhalten, ist, zusätzlich zur Flexibilität durch Skalierbarkeit und Modularisierung, Rekonfigurierbarkeit erforderlich [MUE14]. Rekonfigurierbarkeit im Sinne der Wandlungsfähigkeit bezeichnet hierbei die techni-

sche Anpassungsfähigkeit eines Montagesystems [KLU11, S. 7]. Ein wandlungsfähiges Montagesystem ist in der Lage, seinen Systemzustand durch eine schnelle Rekonfiguration mit geringem Planungsaufwand anzupassen [EIL15, S. 19]. Rekonfiguration umfasst das Entfernen, Anpassen, Austauschen oder Hinzufügen von Systemelementen wie bspw. Prozessmodulen [KAR12, S. 228]. Durch Rekonfiguration können Systemelemente oder neue Prozesstechnologien eingesetzt werden, welche zum Zeitpunkt der Planung noch nicht vorgesehen oder vorhanden waren [EIL15, S. 20].

Einflussfaktoren, welche auf produzierende Unternehmen einen Änderungsdruck ausüben, werden als Wandlungstreiber bezeichnet [WIE05]. Es existieren drei wesentliche Wandlungstreiber: Produktveränderung, Stückzahlveränderung, Montagetechnologieveränderung [EIL15, S. 17]. Um die benötigte Reaktionsfähigkeit auf die Wandlungstreiber sicherstellen zu können, benötigt das Produktionssystem Eigenschaften, die es zu einem Wandel befähigen. Die primären Wandlungsbefähiger sind in Abbildung 2.1 dargestellt. [NYH08, S. 28]

Universalität	Dimensionierung und Gestaltung für verschiedene Anforderungen hinsichtlich Produkt oder Technologie.
Mobilität	Örtlich uneingeschränkte Bewegbarkeit von Objekten
Skalierbarkeit	Technische, räumliche und personelle Atmungsfähigkeit (Erweiter- und Reduzierbarkeit)
Modularität	Standardisierte, funktionsfähige Einheiten oder Elemente
Kompatibilität	Vernetzungsfähigkeit bzgl. Material, Information, Medien, Energie

Abbildung 2.1: Übersicht über die primären Wandlungsbefähiger [NYH08, S. 28]

Bei den Wandlungsbefähigern ist zu beachten, dass diese teilweise in direktem Zusammenhang stehen. So ist Kompatibilität und Universalität beispielweise eine Voraussetzung für eine erfolgreiche Modularität.

Mobilität kann als innere und äußere Mobilität definiert werden. Hierbei bezieht sich die innere Mobilität auf die Beweglichkeit der Produktionsressourcen innerhalb einer Fabrik, die äußere Mobilität hingegen auf die Beweglichkeit über verschiedene Standorte hinweg, also inwiefern eine Lösung ungebunden vom Standort eingesetzt werden kann. [SUD08, S. 14–15]

Im Kontext dieser Arbeit wird angestrebt, die Wandlungsbefähiger in Form von Anforderungen zur Bewertung der Methodik zu verwenden. Aufgrund der direkten Zusammenhänge wird dabei eine Kombination der einzelnen Befähiger gewählt. Wichtig ist insbesondere die Modularität unter Berücksichtigung der Universalität und Kompatibilität, sowie, im Kontext der angepassten Automatisierung die Skalierbarkeit des Automatisierungsgrades durch austauschbare Module. Mobilität wird im Hinblick auf innere und äußere Mobilität unter dem Gesichtspunkt der Übertragbarkeit mittels der Metho-

dik entwickelter Montageanlagen auf weitere Standorte ebenso wie die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Anwendungsszenarien und somit veränderte Montageanlagen verstanden.

Angepasste Automation

Studien in der Industrie belegen, dass insbesondere im Bereich der Montage in der Vergangenheit vermehrt überautomatisiert wurde [BLE04; LAY00]. Es zeigt sich, dass bei mehr als einem Drittel der Betriebe mit automatisierten Anlagen die damit verbundenen Erwartungen nicht erfüllt werden konnten. Viele dieser Betriebe haben den Automatisierungsgrad bei bestimmten Teilsystemen bereits wieder reduziert. Die Analyse zeigt, dass Automatisierungskonzepte in vielen Fällen nicht die notwendige Flexibilität und Wandlungsfähigkeit gewährleisten können. Die Flexibilitätsanforderungen, die sich durch Umsatzschwankungen aber auch Produktionsumstellungen auf neue Produkte oder Varianten ergeben, können bei hochautomatisierten Anlagen nur mit erheblichem Aufwand umgesetzt werden. Als Lösungsansatz wird eine sinnvoll angepasste Automatisierung empfohlen. Diese angepasste Automatisierung ermöglicht geringe Anlagenfixkosten und soll zum Beispiel durch einen modularen Aufbau flexibel gestaltet sein. [LAY00]

Dieser Gedanke wird von Thiernemann aufgegriffen und in Bezug auf die Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) und deren Potenziale zur Kostensenkung näher detailliert [THI05]. Die flexible Arbeitsteilung auf Prozessebene zwischen Mensch und Roboter ist als angepasste Automatisierung definiert. Dies ermöglicht einen optimalen Kompromiss aus Personal- und Investitionskosten. Der Roboter führt hierbei nur die Tätigkeiten aus, die leicht automatisierbar sind. Vorteile sind vereinfachte Prozesswerkzeuge, einfachere Roboterprogrammierung und Materialbereitstellung, sowie die Verwendung standardisierter Komponenten und eine erhöhte Produkt- und Variantenflexibilität. Diese wird durch den einfachen und somit produktneutralen Anlagenaufbau und die Mitarbeiterflexibilität gewährleistet. Die Teilung eines Arbeitsplatzes von Mensch und Roboter führt zu einer Kombination ihrer Fähigkeiten in einer Station, wodurch beliebig große Arbeitsinhalte realisiert werden können. Dies führt zu kompakten Arbeitsplätzen mit einem geringen Platzbedarf und einer erhöhten Kapazitätsdichte. [THI05, S. 38–39]

Der für eine Anlage optimale Automatisierungsgrad liegt vor, wenn die Summe der Montagekosten aus automatisierten und manuellen Tätigkeiten ein Minimum erreicht. Dieser liegt oftmals zwischen 50 % bis 80 %. [KON97, S. 147–148]

Ein weiterer negativer Effekt hochautomatisierter Anlagen ist das sogenannte Automatisierungsdilemma, welches sich anhand der vier Ironien der Automatisierung darstellen lässt.

1. Die Entwickler sehen Menschen als hauptsächliche Fehlerquelle. Diese sollen deshalb durch Automation ersetzt werden. Jedoch sind Entwickler ebenfalls Menschen und somit fehleranfällig. Aus diesem Grund können sich operative Fehler teilweise als Entwicklungsfehler herausstellen.

2. Aufgaben, die sich (aktuell) aufgrund ihrer Komplexität nicht automatisieren lassen, werden manuell durchgeführt. Jedoch ergeben sich hierdurch, gerade bei schwierigen Prozessen, Nachteile im Hinblick auf Reproduzierbarkeit und Nachverfolgbarkeit.
3. Manuelle Tätigkeiten werden durch Automation ersetzt, weil die Systeme die Aufgaben besser durchführen können. Die Mitarbeiter sollen jedoch weiterhin die Systeme überwachen und die korrekte Funktion sicherstellen. In Störfällen soll ein manueller Eingriff erfolgen, bzw. der Mitarbeiter komplett übernehmen.
4. Je zuverlässiger ein Automatisierungssystem ist, desto höher ist der Aufwand an Trainingsmaßnahmen, da im täglichen Betrieb keine Gelegenheit zur aktiven Kontrolle und Auseinandersetzung vorhanden ist. Praktische Kenntnisse über die funktionalen Zusammenhänge und die Prozessteuerung gehen verloren. Diese Fähigkeiten und Kenntnisse sind jedoch essentiell, um in Störfällen ein effektives Eingreifen zu ermöglichen.

[BMW13; LÜD15, S. 127]

Zusammenfassung

Wandlungsfähigkeit ist eine essentiell wichtige Eigenschaft von Montagesystemen, um im Hinblick auf die auftretenden Wandlungstreiber anpassungsfähig zu sein. Die angepasste Automation bietet die Möglichkeit die Wandlungsbefähiger in der Montage umzusetzen und negative Effekte vollautomatisierter Anlagen zu verringern. Um angepasst Automatisieren zu können, müssen die Aufgaben nach den spezifischen Fähigkeiten dem Menschen oder dem Automatisierungssystem zugeordnet werden. Hierzu werden im nächsten Abschnitt Prinzipien erläutert.

2.1.2 Prinzipien zur Aufgabenteilung

In der Literatur finden sich zahlreiche Planungsansätze zur Aufgabenteilung zwischen Mensch und Automatisierungssystemen. Für den Einsatz in der automobilen Endmontage sind die folgenden ausgewählten Methoden geeignet:

- Menschzentrierter und fähigkeitsbasierter Ansatz, basierend auf der hierarchischen Aufgabenanalyse [BEU05; STA06; TAN10]
- Qualitätsbasierte Planungsmethode [REI11]
- Planungsmethode im Hinblick auf Wandlungsfähigkeit und Flexibilität [TAK11]

Fähigkeitsbasierte Zuteilung mit Aufgabenanalyse:

Um Aufgaben strukturiert Menschen und Automatisierungssystemen zuordnen zu können wurde die Methode der hierarchischen Aufgabenanalyse zur Nutzung der Planung von teilautomatisierten Prozessstationen angepasst [TAN10]. Die Aufgabenanalyse ist eine verbreitete wissenschaftliche Methode zur Modellierung menschlicher Aufgaben in der Ergonomie. Bei der Aufgabenanalyse wird die zu erfüllende Hauptaufgabe als Ziel definiert. Die nötigen Aktivitäten, um dieses Ziel zu erreichen, werden in steigender

Detailierung aufgeteilt und in einem hierarchischen Baum dargestellt [STA06]. Die Einzelaufgaben werden Mensch und Roboter durch eine fähigkeitsbasierte Analyse zugeteilt. Die mögliche Zuordnung wird durch die Definition der spezifischen Fähigkeiten von Mensch und Roboter vorgenommen. Ziel ist es, die Stärken beider Interaktionspartner zu kombinieren, um eine optimale Effizienz des Gesamtprozesses zu erreichen [BEU05, S. 61; THI05, S. 38–39].

Ein Ansatz dazu ist das MABA-MABA Prinzip (Men Are Better At-Machines Are Better At) [FIT51]. Menschen sind überlegen in der Entdeckung von Veränderungen, der Wahrnehmung, dem Urteilsvermögen, der Improvisation und dem Erinnern und Verknüpfen von Informationen. Maschinen sind besser in Geschwindigkeit, der Anwendung hoher Kräfte, der Durchführung repetitiver Aufgaben, bei komplexen Berechnung, im Multitasking und dem kurzfristigen Speichern und Abrufen von Informationen. Es ist zudem für Menschen sehr schwierig, über lange Zeit einen monotonen Prozess zu überwachen. Menschen sind jedoch gut darin, in unerwarteten und ungeplanten Situationen kreative Lösungen zu finden. [LÜD15, S. 129]

Ein weiteres Modell, was in diesem Zusammenhang eingesetzt werden kann, ist das Skill-Rules-Knowledge Model [RAS83]. Das Verhalten wird, nach dem Anstieg der benötigten kognitiven Fähigkeiten zur Ausführung der Aufgabe, in drei kognitive Ebenen eingeteilt. Automatisierte Anlagen können sehr gut die Prozesse durchführen, welche immer in gleicher Art und Weise auszuführen sind (skill based) oder Prozesse bei denen aufgrund einer Zustandserfassung eine Auswahl aus vorgespeicherten Regeln getroffen wird (rule based). Menschen haben Vorteile bei der Durchführung von Aufgaben, bei denen auf Grundlage eines wissensbasierten Verhaltens Entscheidungen getroffen werden müssen (knowledge based). [RAS83]

Zur Aufgabenverteilung an Mensch und Roboter lässt sich ableiten, dass Aufgaben die ein hohes Maß an Kognition erfordern effektiver durch den Menschen erledigt oder zumindest geplant werden können. Maschinen haben Vorteile in der reproduzierbaren Ausführung gleicher oder sich wenig verändernder Prozesse.

Qualitätsorientierte Aufgabenplanung

Dieser Ansatz fokussiert sich auf den menschlichen Einfluss auf die Produktqualität [REI11]. Manuellen Prozessen fehlt es durch den menschlichen Einfluss an Reproduzierbarkeit, Prozessfähigkeit und rückverfolgbarer Dokumentation. Die zunehmende Komplexität in der Montage, ausgelöst durch die hohe Varianten- und Modellanzahl, kann den Mitarbeiter überfordern und ist eine mögliche Ursache für Qualitätsprobleme. Nach diesem Ansatz werden qualitätsrelevante Montageprozesse durch eine Prozessanalyse definiert und kritische Prozesse erfasst. Diese Prozesse sollen dann möglichst automatisiert durchgeführt werden, da hierdurch eine erhöhte Prozesssicherheit gewährleistet werden kann. [REI11]

Aufgabenplanung orientiert an Flexibilität und Wandlungsfähigkeit

Dieses Konzept weist die Aufgaben unter Berücksichtigung der notwendigen Investitionen bei zukünftigen Änderungen der Produkte oder Stückzahlen, Mensch oder Roboter zu [TAK11]. Es wird dargestellt, dass zusätzliche Investitionen in automatisierte Systeme teilweise nicht durch den Kosteneinspareffekt der Automation abgedeckt sind. Neue Modelle oder Varianten erfordern jedoch nicht immer Änderungen in jedem Produktionsprozess. Die Prozesse, die wesentliche Änderungen erfordern, sind in der Regel auf bestimmte Bereiche oder Teilprozesse der Produktion beschränkt. Diese Prozesse sollen von Menschen durchgeführt werden, um die zusätzlichen Investitionen zu reduzieren. Automatisierte Systeme sollen möglichst übergreifende Standardprozesse übernehmen, die keine großen zusätzlichen Investitionen benötigen, um sich an die Produktänderungen anzupassen. [TAK11]

Zwischenfazit

Um den Anforderungen bedingt durch die hohe Komplexität und Variantenvielfalt sowie ein stetig wechselndes Produktionsprogramm gerecht zu werden, ist zusätzlich zur Flexibilität die Möglichkeit der Rekonfigurierbarkeit einer Montageanlage erforderlich, um Wandlungsfähigkeit zu erreichen. Mithilfe einer angepassten Automation können Aufgaben basierend auf den technischen Anforderungen und Einflussfaktoren über den Produktlebenszyklus flexibel zugewiesen und der Automatisierungsgrad angepasst werden. Zur intelligenten fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung zwischen Mensch und automatisiertem System sollten diejenigen Aufgaben automatisiert durchgeführt werden, welche kein hohes Maß an Kognition und Anpassungsfähigkeit erfordern, sowie qualitätsrelevante Prozesse, aufgrund der höheren Reproduzierbarkeit. Diejenigen Prozesse, welche sich aufgrund von Varianten oder neuen Modellen häufig ändern, werden idealerweise dem Menschen zugeordnet und die Maschine übernimmt übergreifende Standardprozesse. Der Mitarbeiter sollte stets in der Lage sein, das automatisierte System zu überwachen und bei unerwarteten Situationen oder Fehlern eingreifen zu können.

2.2 Systemanalyse und -entwurf

2.2.1 Anforderungsdefinition und Ableitung von Verantwortlichkeiten

Zur Gestaltung eines Montageprozesses ist im ersten Schritt eine Problemanalyse und Anforderungsdefinition erforderlich, um die relevanten Einflussfaktoren und die zu erfüllenden Verantwortlichkeiten des Montagesystems zu beschreiben. Als Verantwortlichkeit wird eine abstrakte Beschreibung einer zu erbringende Teilleistung bzw. eines abgegrenzten Aufgabenumfanges des Montagesystems verstanden (Vgl. [EIL15, S. 22; MUE11a]). Der Begriff ist teilweise ähnlich zu der Bezeichnung Funktion in den folgenden Vorgehensmodellen zu verstehen, wird jedoch bewusst hiervon abgegrenzt. Grund hierfür ist die explizit angestrebte Trennung zwischen einer lösungsneutralen Verantwortlichkeitsbeschreibung ohne Zuordnung einer technischen Ausführung und der späteren technischen Realisierung.

Zu Beginn wird der Begriff Anforderungen näher erläutert und mit dem Requirement Engineering eine ingenieurmäßige Vorgehensweise zur Anforderungsbeschreibung vorgestellt. Anschließend wird die objektorientierte Analyse als Methode zur Überführung der Anforderungen in ein Beschreibungsmodell gezeigt. Zur Bestimmung und Beschreibung der aufgrund von Anforderungen zu erfüllenden Verantwortlichkeiten wird die Methode der Funktionsanalyse vorgestellt.

Requirement Engineering

Ziel des Requirement Engineerings ist es, in systematischer Vorgehensweise eine Präzisierung der Problemstellung zu erreichen, welche die tatsächlichen Anforderungen an ein Produkt oder einen Prozess zur Erfüllung der Kundenanforderungen bestmöglich beschreibt. Anforderungen lassen sich definieren als: „Aussagen über zu erfüllende Bedingungen oder Fähigkeiten eines Systems, eines Prozesses oder der am Prozess beteiligten Menschen. Sie umfassen Informationen, warum ein System entworfen wird, was dieses System leisten soll und welche Einschränkungen dabei einzuhalten sind.“ [PAR10, S. 25] Diese Anforderungen müssen adäquat, vollständig, eindeutig und widerspruchsfrei sowie verständlich formuliert werden. [GOL11, S. 162,188]

Bevor Anforderungen aufgestellt werden, ist ein Kenntnis der Systemumgebung erforderlich. Anforderungen werden zu Projektbeginn aufgestellt, existieren über die gesamte Projektdauer und können abgeändert werden. Jede Anforderung soll für sich selbst verständlich und eigenständig sein [GOL11, S. 166–170]

Objektorientierte Analyse

Die objektorientierte Analyse stellt eine Methode aus der Softwareentwicklung dar, mit deren Hilfe Kundenforderungen ermittelt und in ein Beschreibungsmodell überführt werden können [BAL97]. Hierzu muss ein konzeptuelles Modell erstellt werden, welches eindeutig, konsistent und realisierbar ist [HEI08, S. 57].

Die Grundlage der objektorientierten Analyse sind Objekte, die sich in der realen Welt befinden. Sie bezieht nicht nur Gegenstände ein, sondern auch Ereignisse und Begriffe aus dem Anwendungsbereich. Die Problemstellung soll verstanden und in einem OOA-Modell beschrieben werden. Dieses Modell beschreibt die wesentliche Struktur und Semantik des Problems, jedoch noch keine technische Lösung. [HEI08, S. 57]

Das Modell stellt die fachliche Lösung des Systems dar und besteht aus einem statischen und dynamischen Teil:

- Das statische Modell zeigt schwerpunktmäßig die Klassen des Systems, die Beziehungen zwischen den Klassen und die Vererbungsstrukturen.
- Das dynamische Modell beschreibt die Funktionsabläufe. Die durchgeführten Aufgaben werden auf einem hohen Abstraktionsniveau beschrieben und können durch Aktivitätsdiagramme oder Zustandsdiagramme detailliert werden.

[HEI08, S. 57]

Zur praktischen Ausgestaltung der Methode sind in der Literatur zahlreiche Vorgehensweisen beschrieben (Vgl. [BAL97; HEI08; PAR10])

Funktionsanalyse nach VDI 2803

Unter Funktionsanalyse wird nach VDI 2803 das „Analysieren der Funktionen von Produkten, Prozessen oder Dienstleistungen verstanden. Diese Objekte sollen bezüglich ihrer verschiedenen Kennzeichen, Merkmale und Attribute abstrahiert, aufgeteilt, eingeordnet und bestimmt werden.“ [VDI 2803, S. 2] Als Funktion wird hierbei jede einzelne Wirkung eines Objektes bezeichnet und durch ein Substantiv und Verb beschrieben, z.B. „Verschraubung durchführen“. Zur Beschreibung werden Klassen von Funktionen und eine Funktionshierarchie gebildet. Auf Grundlage der definierten Einzelfunktionen kann eine Funktionsstruktur erstellt werden, welche die Zuordnung und Untergliederung von Funktionen, z.B. in einem Funktionsbaum ermöglicht [VDI 2803, S. 5].

2.2.2 Vorgehensmodelle zur Systemanalyse und -entwurf

Im Anschluss an die Definition der Anforderungen erfolgt eine Gestaltung des Systementwurfs. Der Begriff Systementwurf bezeichnet die Konzeption eines mechatronischen Systems unter Nutzung ingenieurwissenschaftlicher Mittel. Konzeption bedeutet hierbei eine nachvollziehbare und konsistente Komposition eines Systems aus strukturierten Subsystemen, zur Erfüllung vorgegebener Systemanforderungen. [JAN09, S. 9]

Hierzu gibt es aus den Domänen der Softwareentwicklung sowie der Produktentwicklung und -konstruktion zahlreiche Vorgehensmodelle und Richtlinien. Grundprinzip ist ein möglichst effizienter Ressourceneinsatz bei minimaler Entwicklungszeit. [JAN09, S. 15] Grundsätzlich basieren die Modelle auf den folgenden vier Grundschritten [EIG14, S. 16]:

- Anforderungsdefinition und -analyse
- Konzeption
- Entwurf
- Ausarbeitung
- Detaillierung

Die relevanten Ansätze im Kontext dieser Arbeit werden im Folgenden vorgestellt.

Systementwurf mit Axiomatic Design (AD)

Axiomatic Design wurde von Nam Pyo Suh am Massachusetts Institute of Technology Ende der 70er Jahre entwickelt [SUH90]. Es handelt sich um eine allgemeine Entwicklungs- und Designgrundstruktur, die für viele unterschiedliche Entwicklungsprozesse genutzt werden kann [PAR07, S. 17]. Die Vorgehensweise des Axiomatic Designs beschreibt eine strukturierte Suche und Zuordnung geeigneter Lösungen auf Basis definierter Anforderungen. Die Anforderungen und Lösungen werden während der Modellierung mit AD auf verschiedene Domänen, wie in Abbildung 2.2 gezeigt, aufgeteilt.

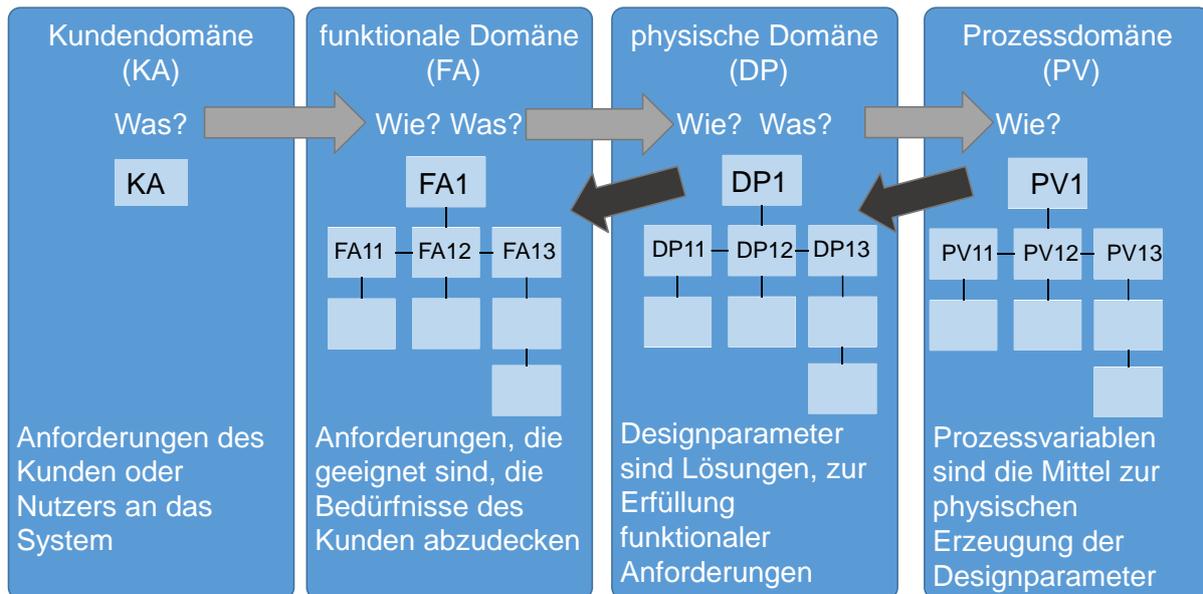


Abbildung 2.2: Aufteilung und Inhalt der Domänen im Axiomatic Design

Der Entwicklungszyklus im Axiomatic Design ist in folgendem V-Modell dargestellt:

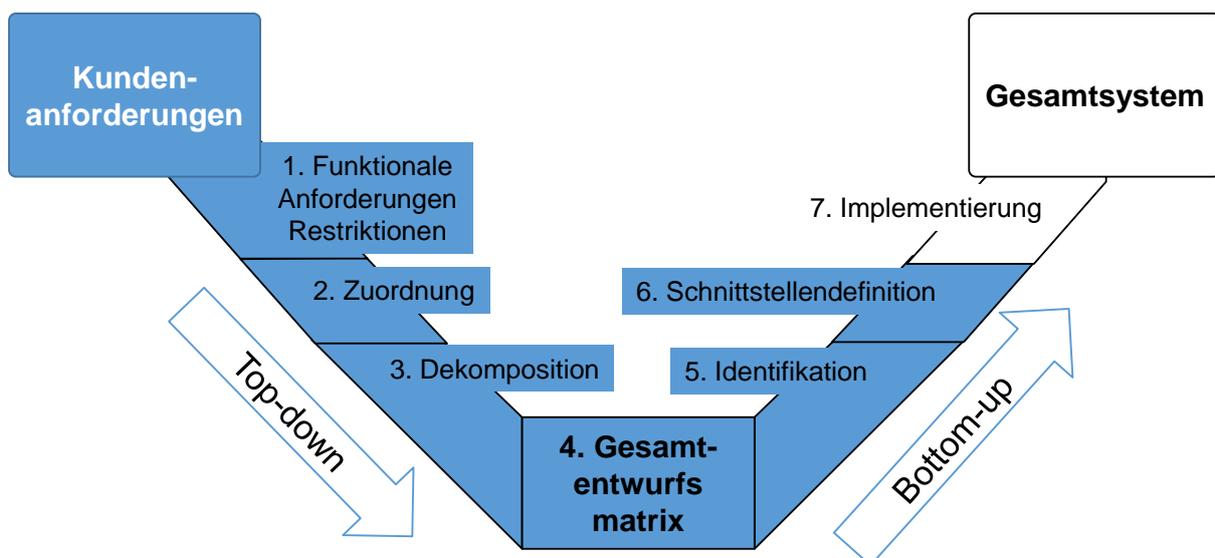


Abbildung 2.3: V-Modell des Entwicklungszyklus im Axiomatic Design [FIE09, S. 39]

Zu Beginn werden die Kundenanforderungen in der Kundendomäne erfasst und anschließend in funktionale Anforderungen (FA) in der funktionalen Domäne übersetzt. In der physischen Domäne erfolgt die Zuordnung der FA zu Design Parametern (DP),

welche der Erfüllung einer FA entsprechen. Zur Zuordnung eines geeigneten Designparameters findet ausgehend von einer funktionalen Anforderung der Übergang in die physische Domäne statt. Danach wird zurück in die funktionale Domäne gesprungen. Hier werden die funktionalen Anforderungen weiter unterteilt. Dieser Vorgang wird wiederholt, bis elementare FA DP-Paare bestimmbar sind. Diese können unmittelbar, d.h. ohne weitere Dekomposition implementiert werden. [FIE09, S. 44; WEB15]

Die Modellierungsergebnisse werden in Entwurfsmatrizen und in einer Gesamtentwurfsmatrix dokumentiert und anschließend mit Hilfe des Unabhängigkeits- und Informationsaxioms (siehe unten) geprüft. Danach werden benötigte Module identifiziert und definiert, sowie deren Beziehungen und Schnittstellen. Der letzte Schritt ist die Implementierung des Entwurfs, was der Abbildung der physischen Domäne auf die Prozessdomäne entspricht. Durch das beschriebene Domänenkonzept soll der kreative Modellierungsprozess systematisiert werden. Modellierungsgegenstände die aus Sicht des Kunden, des Konstrukteurs, des zu gestaltenden Systems und des Prozesses zur Herstellung des Systems relevant sind werden voneinander getrennt. [FIE09, S. 36, 39; SUH01]

Entscheidend zur Bewertung des Systementwurfs ist die Erfüllung der Grundaxiome:

1. Das Unabhängigkeitsaxiom: Bei einem idealen Design bleiben die funktionalen Anforderungen unabhängig voneinander. Einzelne Designparameter können zur Erfüllung der zugeordneten funktionalen Anforderung geändert werden, ohne dass andere funktionale Anforderungen beeinträchtigt werden. [FIE09, S. 61]
2. Das Informationsaxiom: Das Informationsaxiom wird als Entscheidungsgrundlage genutzt, um aus Entwurfsalternativen auszuwählen. Es ermöglicht die quantitative Bewertung der Entwürfe. Derjenige Entwurf, welcher das Unabhängigkeitsaxiom erfüllt und den geringsten Informationsgehalt aufweist wird ausgewählt. Dieser Entwurf stellt somit die einfachste Lösung des beschriebenen Problems dar. [FIE09, S. 75–76; PAR07, S. 18]

Entwicklungs-/ Konstruktionsmethodik VDI 2206 und 2221

Eine Entwicklungs-/ Konstruktionsmethodik ist ein universell anwendbares Vorgehen zum Konstruieren und Entwickeln von technischen Produkten unter der Verwendung von Handlungsanweisungen [PAH05, S. 10]. Zwei relevante Richtlinien stellen die VDI-Richtlinien 2206 und 2221 dar, welche im Folgenden genauer erläutert werden.

VDI 2206 Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme

Das Vorgehen der Richtlinie besteht aus einem flexiblen Vorgehensmodell, das sich im Wesentlichen auf drei Elemente stützt:

- allgemeiner Problemlösungszyklus auf der Mikroebene
- V-Modell auf der Makroebene
- vordefinierte Prozessbausteine zur Bearbeitung wiederkehrender Arbeitsschritte bei der Entwicklung mechatronischer Systeme [VDI 2206, S. 26]

Problemlösungszyklus als Mikrozyklus:

Die Strukturierung des Entwicklungsprozesses erfolgt auf Grundlage eines allgemeinen Problemlösungszyklus. Dieser soll bei der Bearbeitung planbarer Teilaufgaben, sowie bei der Lösung nicht vorhersehbarer Probleme unterstützen. [VDI 2206, S. 26] Das Vorgehen ist in der Richtlinie detailliert beschrieben (Vgl. [VDI 2206, S. 28–29])

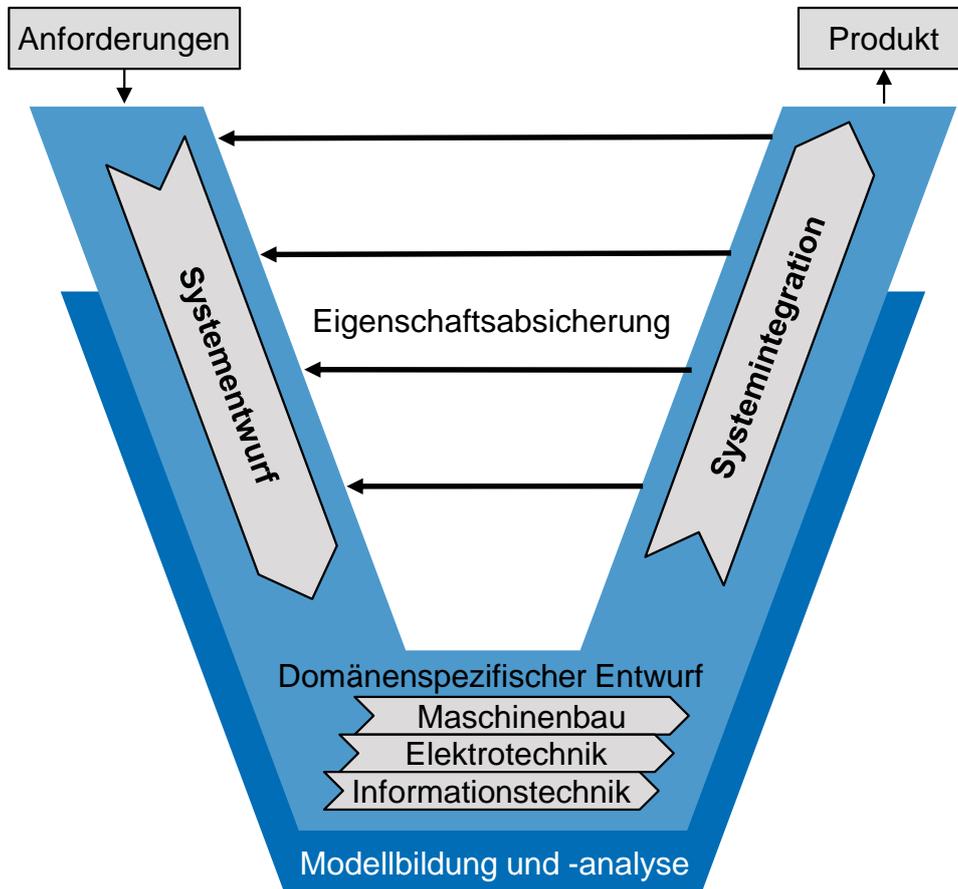


Abbildung 2.4: Problemlösungszyklus und V-Modell der VDI 2206

Das V-Modell als Makrozyklus:

Das grundsätzliche Vorgehen folgt dem an die Anforderungen der Mechatronik angepassten V-Modell (Abbildung 2.4), welches die logische Abfolge der einzelnen Schritte innerhalb der Entwicklung mechatronischer Systeme beschreibt: [VDI 2206, S. 26]

Anforderungen: Ausgangspunkt der Vorgehensweise ist ein konkreter Entwicklungsauftrag. Die Aufgabenstellung wird detailliert und in Form von präzisen Anforderungen beschrieben. Das spätere Resultat wird anhand dieser Anforderungen bewertet. [VDI 2206, S. 29]

Systementwurf: Ausgangspunkt des Systementwurfs ist die Abstraktion der Anforderungsliste. Die wesentlichen Punkte der Problemstellung sollen herausgearbeitet werden. Hierbei wird eine Reduktion auf grundlegende Aussagen und eine lösungsneutrale Formulierung des Problems durchgeführt. Ziel ist ein domänenübergreifendes Lösungskonzept, welches die wesentlichen physikalischen und logischen Wirkungsweisen beschreibt. Die Gesamtfunktion des Systems wird in Teilfunktionen zerlegt, diesen

werden geeignete Wirkprinzipien bzw. Lösungselemente zugeordnet und die Erfüllung der Funktionen innerhalb des Systems geprüft. [VDI 2206, S. 32-33, 35]

Domänenspezifischer Entwurf: Basierend auf dem entwickelten Lösungskonzept erfolgt eine weitere Konkretisierung. Bei der Zuordnung von Wirkprinzipien und Lösungselementen zu Teilfunktionen erfolgt eine Partitionierung, also eine Aufteilung der Funktionserfüllung auf einzelne Domänen. Diese Domänen entsprechen hier einer Untergliederung in Einzeldisziplinen (Maschinenbau, Elektrotechnik, Informationstechnik). Die Entwicklung erfolgt domänenspezifisch durch detailliertere Auslegungen und Berechnungen, um besonders bei kritischen Funktionen die Funktionserfüllung sicherzustellen. [VDI 2206, S. 35]

Systemintegration: Die Ergebnisse aus den einzelnen Domänen werden zu einem Gesamtsystem integriert, um das Wirken im Gesamtsystem untersuchen zu können. Entsprechend der Aufgabenstellung wird ein geeignetes Vorgehen zur Integration bestimmt. [VDI 2206, S. 35]

Eigenschaftsabsicherung: Der Entwurfsfortschritt muss kontinuierlich anhand des spezifizierten Lösungskonzepts und der Anforderungen überprüft werden. Es ist sicherzustellen, dass die vorhandenen mit den gewünschten Systemeigenschaften übereinstimmen. [VDI 2206, S. 38]

Modellbildung und -analyse: Die einzelnen Phasen werden durch die Darstellung und Validierung der Systemeigenschaften mit Hilfe von Modellen und rechnerunterstützten Simulationswerkzeugen begleitet. [VDI 2206, S. 35]

Produkt: Ergebnis eines Durchlaufs des Makrozyklus ist ein Produkt. Dieses Produkt kann hierbei nicht nur das finale Erzeugnis darstellen, sondern auch Zwischenstufen innerhalb der zunehmenden Konkretisierung. [VDI 2206, S. 30]

VDI 2221 Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte

Grundsätzliche Vorgehensweise

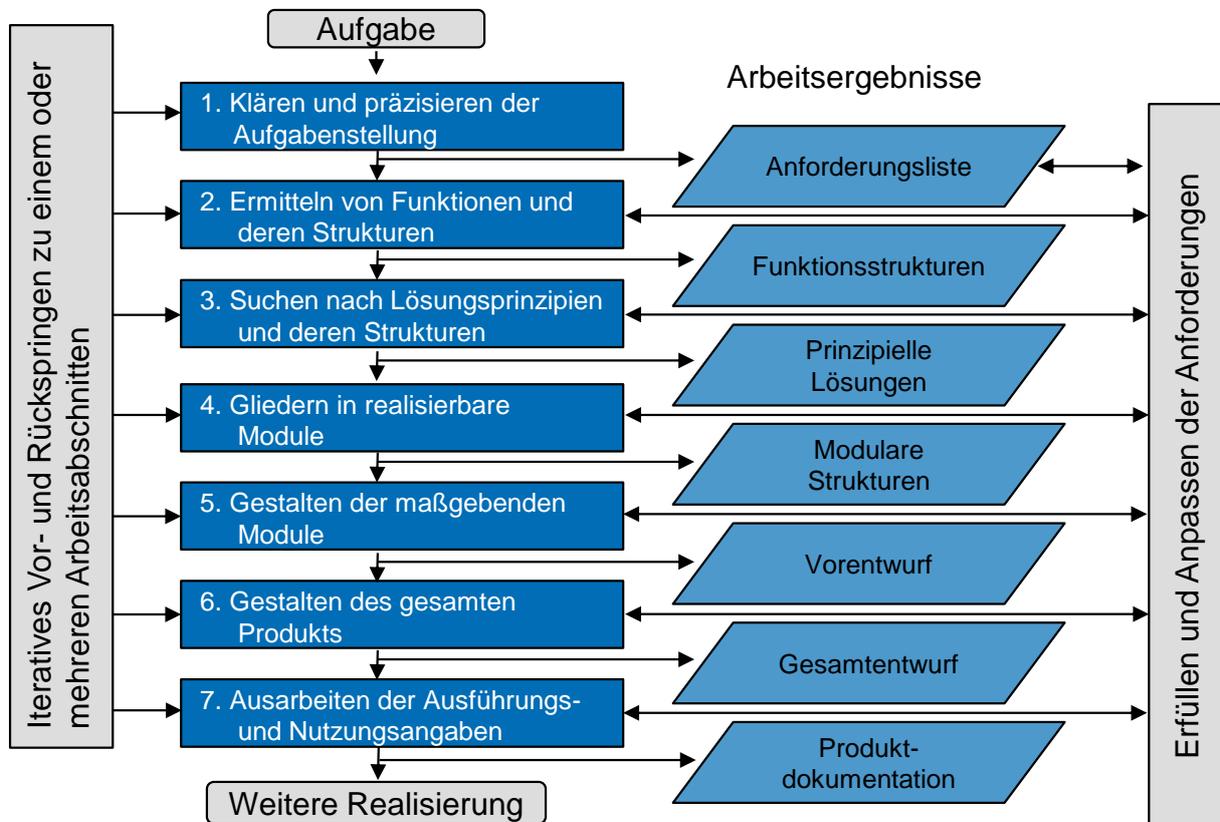


Abbildung 2.5: Vorgehensweise in der Entwicklungsmethodik

Zunächst wird die Aufgabenstellung vollständig erfasst, indem der Zweck der Entwicklung definiert wird. Zusätzlich werden gewünschte und unerwünschte Eigenschaften der Entwicklung ermittelt. Die Dokumentation erfolgt in einer Anforderungsliste. Die Anforderungen werden in Grund- und Attraktivitätsanforderungen sowie in spezifische technische Leistungsanforderungen unterteilt. [PAH05, S. 213–221]

Im nächsten Arbeitsschritt werden die Funktionen und deren Strukturierung in Form einer Funktionsstruktur erarbeitet. Dazu werden zunächst alle Ein- und Ausgänge von Signal-, Stoff- und Energieströmen des Systems ermittelt, die für die Erfüllung der Gesamtfunktion benötigt werden. Die Gesamtfunktion wird anschließend in Teilfunktionen gegliedert, wobei die Funktionen als „Black-Boxes“ angenommen werden. [PAH05, S. 44]

Im nächsten Entwicklungsabschnitt wird aus Prinziplösungen ein Konzept erstellt. Eine Prinziplösung beschreibt die Auswahl eines oder mehrerer physikalischer Effekte, eines Effekträgers und der qualitativen Gestaltung des Wirkortes, um eine Teilfunktion zu gewährleisten. Wenn der Effekträger, Wirkort oder der physikalische Effekt variiert werden, entstehen neue Prinziplösungen. [PAH05, S. 52; VDI 2221, S. 10] Wenn zu allen Teilfunktionen Prinziplösungen ermittelt sind, werden mehrere Konzepte durch

die Variation der Prinziplösungen erstellt, wobei die technische Verträglichkeit berücksichtigt werden muss. (Vgl. [PAH05, S. 53-54, 163]) Eine Bewertung der Konzepte erfolgt durch unabhängige gewichtete Bewertungskriterien, die von einer Zielvorstellung abgeleitet werden können. Über eine Schwachstellenanalyse kann die Auswahl validiert und Optimierungsansätze erkannt werden. [PAH05, S. 167–170]

Ziel des nächsten Arbeitsschrittes ist die Erarbeitung von modularen Strukturen, um das Konzept in realisierbare Module zu gliedern. Durch die modulare Struktur werden Teilsysteme und Systemelemente angeordnet und die zu verwendenden Schnittstellen können definiert werden [VDI 2221, S. 10].

Nach der Entwicklung einer modularen Struktur werden in der sogenannten Grobgestaltung die maßgebenden Module entwickelt. Dadurch wird ein Vorentwurf gewonnen, der die räumlichen Eigenschaften des Systems definiert. Ferner werden Verbindungsverfahren, zu verwendende Normteile und Wiederholteile festgelegt. (Vgl. [PAH05, S. 167–170; VDI 2221, S. 10–11])

Der Gesamtentwurf resultiert aus der Feingestaltung. Dabei werden die Module und die noch nicht bearbeiteten Elemente detailliert. Unter anderem werden Abmessungen, Toleranzen oder Oberflächenverfahren festgelegt und die Elemente werden untereinander verknüpft. Dieser Arbeitsschritt wird durch Zeichnungen und vorläufige Stücklisten dokumentiert. Abschließend werden umfassende Produktdokumentationen erstellt. Dazu werden neben Stücklisten Gesamt- und Teilleisten, Baugruppenpläne und Zusammenbauzeichnungen erzeugt. [VDI 2221, S. 11]

Objektorientierte Entwicklungsmethoden

„Objektorientierung bezeichnet ein durchgängiges Entwicklungsprinzip von der Analyse über die Entwicklung und Implementierung bis hin zur Wartung. Durch eine natürliche Modellierung der Realität, Wiederverwendbarkeit und leichte Erweiterbarkeit soll die Komplexität eines Systems beherrschbar gemacht werden. Ein System besteht in der Objektorientierung ausschließlich aus Objekten, die miteinander über Nachrichten kommunizieren.“ [SIE17]

Ein Objekt bezeichnet „einen Gegenstand, eine Person oder einen Begriff. Es hat eine eindeutige, unveränderbare Identität und charakteristische Eigenschaften. Jedes Objekt verfügt über Attribute und Methoden. Attribute beschreiben charakteristische Daten bzw. Eigenschaften von Objekten. Die Attribute sind für alle Objekte einer Klasse gleich, können aber unterschiedliche Werte haben.“ [PAR10, S. 159, 162]

Die Methoden stellen „spezifische ausführbare Tätigkeiten (eine Funktion oder einen Algorithmus) dar, welche durch das Objekt ausgeführt werden, um einer Verantwortlichkeit nachzukommen. Beispiele sind der Zugriff auf Attribute, die Durchführung von Berechnungen, die Aktivierung anderer Operationen, die Auswahl von Objekten nach vorgegebenen Kriterien oder das Erzeugen und Löschen von Objekten.“ [PAR10, S. 162–163]

„Eine Klasse ist eine Kollektion von Objekten mit gleichen Eigenschaften (Attribute), gemeinsamer Funktionalität (Methoden) sowie gemeinsamen Beziehungen zu anderen Objekten und gemeinsamer Semantik. Die Klasse definiert die Eigenschaften und das Verhalten ihrer Objekte, die auch Instanzen der Klasse genannt werden.“ [PAR10, S. 160] Jedes Objekt einer Klasse ist eindeutig unterscheidbar, auch wenn die Eigenschaftsausprägungen gleich sind. [PAR10, S. 161]

Objektorientierte Modellierung

Bei der objektorientierten Modellierung werden definierte Module in Form von Klassen eingeführt. Auf Basis einer Anforderungsbeschreibung mit anschließender Systemanalyse werden die nötigen Methoden zur Lösung der Aufgabe definiert. Die Formulierung eines Modells erfolgt bei objektorientierten Techniken in notwendigen Verantwortlichkeiten (z.B. Teil zuführen) und nicht in technischen Lösungen wie Vibrationswendelförderer. Die anwendungsorientierte Sicht steht gegenüber einer technisch orientierten Sicht im Vordergrund der Systembeschreibung. Bei einer objektorientierten Entwicklung wird zunächst hauptsächlich im Problembereich (Anwendungsbereich) der zu lösenden Aufgabe gedacht. Erst später findet ein Übergang in den Lösungsbereich und die Konzepterstellung der technischen Realisierung statt. Man versucht zunächst, die relevanten Objekte im Problembereich durch Abstraktion zu erkennen, um die wesentlichen Aspekte eines Objektes bzw. einer Klasse zu definieren. Die Wechselwirkungen der Objekte müssen ebenso bestimmt werden. Die Objekte des Problembereichs und ihre Notation bleiben im ganzen Projekt erhalten und werden in den Lösungsbereich übertragen. Dies ermöglicht eine Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse der Systemanalyse über den Systementwurf bis zur technischen Umsetzung. Ebenso erlaubt es eine einfachere Übersicht bei großen Systemen und die Unterteilung in gekapselte Einzelkomponenten, welche effizient entwickelt und wiederverwendet werden können. [GOL11, S. 282–284]

Ansatz des Systems Engineering

Systems Engineering ist ein interdisziplinärer Ansatz zur Entwicklung und Realisierung komplexer technischer Systeme. Der Begriff bezeichnet die Entwicklung eines mechanischen Gesamtproduktes als Kombination aus Hardware und Software. Wesentlich ist ein interdisziplinärer Ansatz, welcher die mechanische, elektronische und die softwaretechnische Entwicklung miteinbezieht. Begonnen wird mit der Anforderungsanalyse. Hier werden die Kundenanforderungen aufgenommen. Die Formulierung dieser Anforderungen erfolgt verständlich, umfassend, knapp und quantitativ. Beschrieben werden sowohl die Randbedingungen als auch funktionale Anforderungen. Innerhalb der folgenden funktionalen Analyse wird eine Dekomposition der Funktionen durchgeführt. Eine Funktion beschreibt jeweils einen spezifischen Leistungsumfang des Systems. Ähnlich der Prinzipien des Axiomatic Designs muss bei der Anforderungsdefinition jede Funktion, mindestens auf eine Anforderung zurückzuführen sein. Nach Abschluss der funktionalen Analyse wird eine Definition des zu entwickelnden Systems vorgenommen. Hier werden sowohl die physikalischen Systemkomponenten als auch

Softwareumfänge beschrieben. Die so definierten Ansätze werden innerhalb der Systemanalyse evaluiert und ihre Tauglichkeit zur Erfüllung der technischen Anforderungen bewertet. Hilfsmittel hierzu sind Modellierungen, Simulationen und Experimente. Eine Auswahl einer spezifischen Lösungsalternative erfolgt auf Basis ihrer Auswirkung auf das Gesamtsystem [DEF01; FRA16a, S. 21–22]

Gegenüberstellung der vorgestellten Vorgehensmodelle und Richtlinien

Die Methoden gehen nach einem ähnlichen Muster, analog zum Vorgehen bei klassischen Problemlösungsprozessen (Bspw. DMAIC aus Six Sigma) vor. Im ersten Schritt wird die Aufgabenstellung ermittelt, im Anschluss die detaillierten Kunden- bzw. Prozessanforderungen definiert. Die Anforderungen werden in der Systemanalyse herausgearbeitet und darauf aufbauend im Systementwurf Lösungskonzepte erstellt. Diese werden evaluiert, mit den Anforderungen abgeglichen und ein finales Umsetzungskonzept erstellt. Die Vorgehensweisen im Detail sind unterschiedlich und aus diesem Grund werden die vorgestellten Methoden nach Ihren wichtigsten Teilprozessen untergliedert gegenübergestellt:

- Einbindung der Anforderungen
- Vorgehen beim Systementwurf
- Prinzipien der Untergliederung
- Definition der technischen Ausprägung
- Vorgehensweise zur Systemintegration

Planungsphasen	Axiomatic Design	VDI 2206
Einbinden der Anforderungen	Jede vorhergehende Domäne definiert die Anforderungen für die nachfolgende Domäne. Kundenanforderungen werden in funktionale Anforderungen übertragen	Konkreter Entwicklungsauftrag bestehend aus Anforderungsbeschreibung, meist in zu erreichenden tech. Leistungsmerkmalen
Systementwurf	Funktionale Anforderungen werden Design Parametern zugeteilt. Die Zuordnung von Anforderungen zu korrespondierenden Lösungen wird in Matrizen abgebildet	Herausarbeiten allgemeingültige und lösungsneutrale Problemstellung. Hieraus Entwicklung eines übergreifenden Lösungskonzeptes welches die wesentlichen Wirkungsweisen des Produktes beschreibt
Untergliederung	Iterativer Dekompositionsprozess zwischen funktionaler und physischer Domäne bis elementare Zuordnung von Teilfunktion zu Designparameter gefunden ist.	Untergliederung der Gesamtfunktion in Teilfunktionen. Diesen werden geeignete Wirkprinzipien zugeordnet. Anhand der Funktionsstruktur wird die Funktionserfüllung im Gesamtsystem überprüft.
Technische Ausprägung	Nach Anwendung der Grundaxiome wird der gewählte Gesamtentwurf implementiert indem die abstrakten Designparameter Prozessvariablen zugeordnet werden, was deren tech. Merkmalen entspricht.	Den ermittelten Wirkprinzipien werden geeignete Lösungselemente zugeordnet welche der benötigten Teilfunktion nachkommen.
Systemintegration	Durch die zuvor gebildete Gesamtentwurfsmatrix können Module und Beziehungen abgeleitet werden. Anschließend erfolgt die Implementierung als Abbildung der physischen Domäne auf die Prozessdomäne	Ergebnisse aus den einzelnen Domänen werden zu einem Gesamtsystem integriert. Erfüllung der Gesamtfunktion wird durch Funktions- bzw. Wirkstruktur abgesichert

VDI 2221	Objektorientierte Modellierung	Systems Engineering
<p>Entwicklungszweck und Eigenschaften werden definiert und in Leistungsanforderungen unterteilt</p>	<p>Auf Basis einer Anforderungsbeschreibung werden benötigte Methoden zur Lösung der Aufgabe definiert</p>	<p>Anforderungsanalyse, nimmt die Kundenanforderungen auf. Ergebnis sind die zu berücksichtigenden Randbedingungen und funktionale Anforderungen</p>
<p>Funktionsstruktur mit allen benötigten Medienströmen des Systems wird erarbeitet. Anschließend werden Teilfunktionen gebildet welche durch Prinziplösungen abgebildet werden. Diese werden in eine Modulare Struktur eingebettet und mit steigender Granularität über Vorentwürfe zum Gesamtentwurf ausgearbeitet.</p>	<p>Ein Modell zur Lösung der Gesamtaufgabe wird erstellt, indem die benötigten Methoden eingebunden werden. Es wird im Problembereich der Aufgabe gedacht und durch Abstrahierung die wesentlichen Aspekte der benötigten Objekte herausgearbeitet. Die Objekte und ihre Wechselwirkungen werden bestimmt und anschließend in den Lösungsbereich übertragen. Hier wird jedem Objekt eine technische Realisierung zugeordnet</p>	<p>Eine funktionale Analyse bestimmt Teilfunktionen. Diese bestimmen was und mit welchen Leistungsanforderungen ausgeführt werden muss. Den Übergang zwischen funktionaler Analyse und Designsynthese bildet die Produktdefinition. Diese kann sowohl physikalische oder softwaretechnische Elemente darstellen. Die so definierten Ansätze werden innerhalb der Systemanalyse evaluiert und ihre Tauglichkeit zur Erfüllung der technischen Anforderungen bewertet.</p>
<p>Basierend auf den Anforderungen wird die zu erfüllende Gesamtfunktion und daraus benötigte Teilfunktionen gebildet. Diese Teilfunktionen werden durch Prinziplösungen erfüllt. Die ausgewählten Prinziplösungen werden als abgeschlossene Module entwickelt, welche im Gesamtentwurf die zugehörige Teilfunktion erfüllen müssen</p>	<p>Die Untergliederung des Systems erfolgt durch die Definition der erforderlichen Methoden. Diese Methoden werden zu Objekten zugeordnet welche die Methoden ausführen können. Objekte mit gleichen Eigenschaften gehören einer Klasse an.</p>	<p>Innerhalb der funktionalen Analyse erfolgt eine Dekomposition der Funktionen. Eine Funktion definiert was und mit welchen Leistungsanforderungen ausgeführt werden muss. Jede Funktion muss mindestens auf eine Anforderung zurückzuführen sein.</p>
<p>Innerhalb der Vor- und Gesamtentwurfes werden die Prinziplösungen in steigender Detaillierung in technische Lösungen übertragen</p>	<p>Jedes Objekt wird nach dem Systementwurf entsprechend seiner Methoden und Attribute in eine technische Lösung überführt</p>	<p>Den Übergang zwischen funktionaler Analyse und Designsynthese bildet die Produktdefinition. Dies kann sowohl physikalische oder softwaretechnische Elemente darstellen.</p>
<p>Innerhalb des Vorentwurfs werden die Verknüpfungen der Module zur Gesamtstruktur ausgearbeitet. Die detaillierte Verknüpfung erfolgt im Gesamtentwurf</p>	<p>Innerhalb einer gewählten Systemarchitektur werden die Objekte integriert. Innerhalb des Funktionsablaufes werden die benötigten Methoden aufgenommen und erfüllen die zugeordneten Verantwortlichkeiten</p>	<p>Die so definierten Ansätze werden innerhalb der Systemanalyse evaluiert und ihre Tauglichkeit zur Erfüllung der technischen Anforderungen bewertet. Hilfsmittel hierzu sind Modellierungen und Simulationen. Lösungsalternativen werden auf Basis der Systemauswirkung ausgewählt.</p>

Abbildung 2.6: Vergleich der Vorgehensmodelle

2.2.3 Mechatronische Modularisierung von Montageanlagen

Wie bereits in Kapitel 2.1.1 ausgeführt wurde, ist Modularität ein zentraler Wandlungsbefähiger. Um diesen zu berücksichtigen, können Montageanlagen als eine Kombination mechatronischer Module strukturiert und geplant werden. Diese modulare Grundstruktur kennzeichnet sich dadurch, dass ein von der Montageanlage durchzuführende Verantwortlichkeit genau einer Systemkomponente zugeordnet ist (Vgl. [SAN96; ULR95]). Im Folgenden werden die unterschiedlichen Betrachtungsweisen des Begriffes „Modularität“ in der Literatur, aus der Montageplanung und der mechatronischen Sichtweise beschrieben.

Montageplanungssichtweise

Landherr stellt die Modularisierung als Möglichkeit dar, die Systemkomplexität durch die Unterteilung des Gesamtsystems zu verringern. Ein Modul bezeichnet eine unabhängige, abgeschlossene Funktionseinheit innerhalb einer Montageanlage. Die Kombination dieser Funktionseinheiten erfüllt die Funktion des Gesamtsystems. Ein Modul hat einen geringeren Komplexitätsgrad als das Gesamtsystem und besitzt definierte und eindeutige Schnittstellen. Module können in Sub-Modulen weiter unterteilt werden. Um einen durchgängigen Planungsprozess ausgehend vom Produkt bis zum Betriebsmittel zu gewährleisten, wird die Modularisierung des Gesamtsystems anhand funktionsrelevanter Einheiten durchgeführt. Hiermit kann ein ganzheitlich systematisches Verständnis erreicht und eine flexible und effiziente Konfiguration ermöglicht werden. Zusätzlich zur Beschreibung der Verantwortlichkeit des Moduls hinsichtlich der Gesamtfunktion müssen Informationen vorliegen, welche die Interaktionsmöglichkeiten mit weiteren Systemelementen beschreiben. [LAN15, S. 59–60]

Nach Göpfert definiert sich eine modulare Systemarchitektur durch funktionale und physische Unabhängigkeit. In einem funktional-modularen System werden den Komponenten einzelnen Funktionsumfänge zugewiesen. Diese werden zur Abgrenzung der Einzelfunktionen als Module ausgeführt. Sie sind zusätzlich physisch unabhängig ausgelegt, um eine nachträgliche Austauschbarkeit zu ermöglichen. Wenn beide Unabhängigkeitsdimensionen erfüllt sind, handelt es sich um einen modularen Aufbau. [GOE98; MUE11b]

Die Zusammenstellung von Einzelmodulen zur Auswahl und Kombination wird häufig als Baukasten bezeichnet [SCH11, S. 134]. Originär bezeichnet dieser Begriff die Herstellung eines Objekts aus einer definierten und spezifizierten Menge von Einzelelementen. Ziel ist die Bildung vielfacher und anforderungsgerechter Varianten des Objektes aus einer begrenzten Menge an Grundelementen. [WE117, S. 29]

Aus den Baukästen können modulare Komplettsysteme gebildet werden, welche sich aus Montagemodulen zusammensetzen, die alle Komponenten zur Ausführung einer Montageaufgabe beinhalten. Ein Systemaufbau aus möglichst produktneutralen Modulen erlaubt ein hohes Maß an Rekonfigurierbarkeit sowie Wiederverwendbarkeit. [KLU11, S. 23–24]

Neben den Begriffen der Modularisierung und Baukästen findet sich insbesondere innerhalb der Gestaltung von Produktarchitekturen die Vorgehensweise der Bildung von Plattformen. Grundprinzip ist es, Komponenten und Module produktübergreifend zu verwenden. Hierbei wird eine einheitliche Plattform für mehrere Produktderivate verwendet. Die verwendeten Gleichteile (Module und Komponenten) werden aus einem Baukasten konfiguriert. Die Individualisierung des Produktes erfolgt durch produktspezifische Bauteile, welche auf Grundlage festgelegter Differenzierungsmerkmale bestimmt werden. Dies ermöglicht die Gestaltung individueller Produkte mit stark reduzierter Variantenanzahl. Als Beispiel ist die Plattformstrategie von Volkswagen zu nennen. Auf Grundlage des modularen Quer- und Längsbaukastens werden unter Wiederverwendung von gleichen Modulen (Motoren, Achsen etc.) verschiedene Fahrzeuge innerhalb der VW-Markenfamilie durch Individualkomponenten (Karosserieteile, Designelemente etc.) realisiert. [SCH11, S. 119–120; WEI17, S. 30–31]

Neben der Reduzierung der Varianten bietet diese Vorgehensweise den Vorteil, dass auf Grundlage der Produktplattform ebenso eine modulare plattformbasierte Strukturierung der Produktion erfolgen kann. Einzelne Produktmodule können standortunabhängig auf einer Produktionslinie hergestellt werden. Beispiel ist der modulare Produktionsbaukasten von Volkswagen, welcher auf den zuvor beschriebenen Produktbaukästen aufbaut. Hierbei wurde die Produktion in Einzelelemente gegliedert, um einen bedarfs- und kapazitätsgerechten Aufbau zu ermöglichen. Durch diese Vorgehensweise wird eine hohe Skalier- und Rekonfigurierbarkeit und durch standardisierte Anlagen Effizienz- und Skalenvorteile innerhalb des Produktionsverbundes erreicht. [WEI17, S. 55–56]

Mechatronische Sichtweise

In der mechatronischen Sichtweise kann Modularisierung als eine Untergliederung des Gesamtsystems verstanden werden mit dem Ziel, Einheiten zu bilden, welche eine spezifische Verantwortlichkeit erfüllen und individuell entwickelt werden können. (Vgl: [LAN02; SAL02; SAN96])

In der Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme wird der Grundaufbau mechatronischer Systeme im Allgemeinen als synergetische Integration verschiedener mechatronischer Module beschrieben. Module bezeichnen hier „Systemelemente oder Bauteile, die zu einer Gruppe zusammengefasst werden und gemeinsam eine bestimmte Funktion erfüllen.“ [VDI 2206, S. 16] Die Grundstruktur ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Die einzelnen Module sollen möglichst unabhängig voneinander sein; sie interagieren über standardisierte Schnittstellen. Dieser Aufbau soll den Austausch von einem oder mehreren Modulen ermöglichen, ohne die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems zu beeinträchtigen. [SCH00; ULR95; VDI 2206]

Eine Verkopplung mehrerer Grundbausteine über ihre mechatronische Funktionsstruktur und mechanische Tragstruktur führt zur Entstehung eines Systems höherer Ordnung. Auf dieser höheren Stufe werden zusätzliche Aufgaben durch einen Koordi-

nator, welcher teilweise zusätzliche Sensorik und Informationsverarbeitung nutzt, realisiert. Der Koordinator ist verantwortlich für Fehlerdiagnose und Überwachungsalgorithmen und generiert Vorgaben für untergeordnete mechatronische Grundbausteine. [VDI 2206, S. 16]

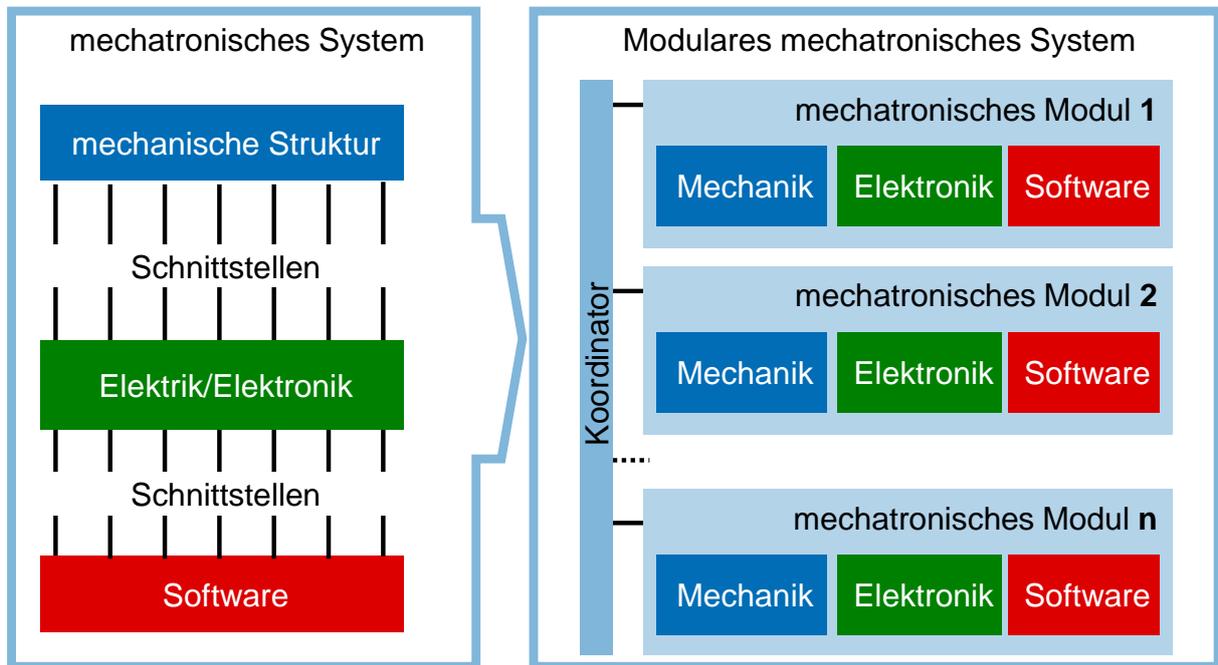


Abbildung 2.7: Aufbau eines modularen Systems und Systemstruktur

Vorgehensweise bei der Bildung von Modulen

Nach Landherr stellt ein Modul eine abgeschlossene und damit unabhängige sowie austauschbare funktionale Einheit dar, die eine Kundenanforderung erfüllt [LAN15, S. 59]. Der funktionale Ansatz beschreibt die Kundensicht auf eine Maschine oder Anlage. Funktional bedeutet, dass die Strukturierung und Modularisierung einer Anlage interdisziplinär durch funktionale Einheiten stattfindet und nicht unterteilt nach Disziplinen wie Mechanik, Elektronik oder Software [BUC15, S. 4–6]. Eine ähnliche Vorgehensweise wird im Ansatz des Axiomatic Designs gewählt. Es wird ein iterativer Dekompositionsprozess gefolgt von der Anwendung des Unabhängigkeits- und Informationsaxioms durchgeführt, um für jede funktionale Anforderung unabhängige und möglichst einfache Designparameter zu definieren. Alle Designparameter, die auf die Erfüllung einer spezifischen funktionalen Anforderung wirken, werden zu einem Modul vereint (Vgl. [FIE09; SUH01]). Das Prinzip der modularen Systemstruktur ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

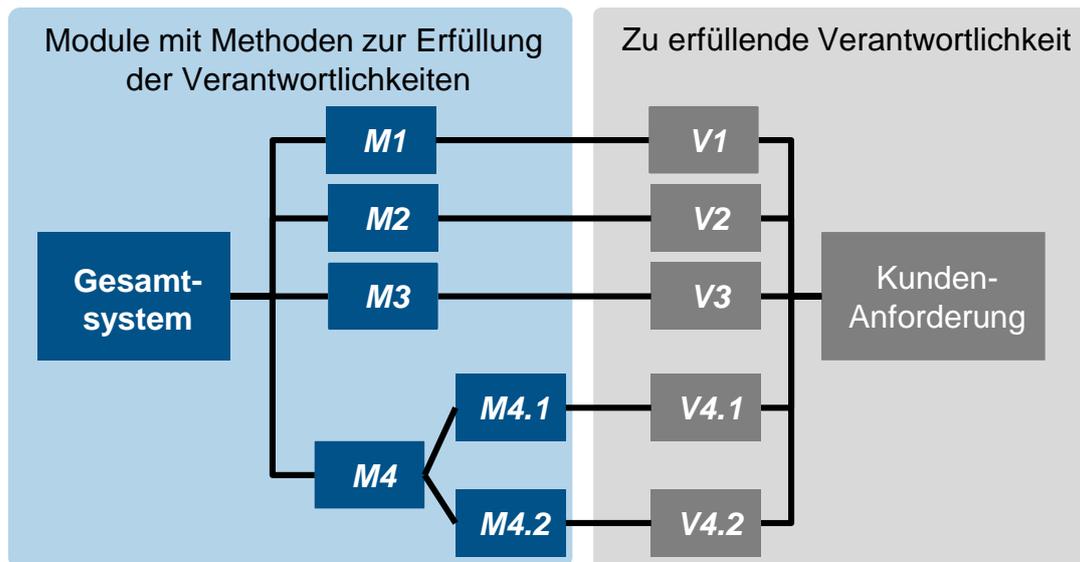


Abbildung 2.8: modulare Systemstruktur

Zur Identifikation und Definition von Modulen werden folgende Richtlinien angewendet: Innerhalb der Modularisierung wird eine notwendige Anzahl von Modulen bestimmt. Möglichst wenige und funktional umfangreiche Module sollen dazu beitragen, die Komplexität des Systems zu minimieren. Zur Steigerung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit soll eine hohe Anzahl von Kombinationsmöglichkeiten möglich sein, hierfür ist eine Mindestanzahl an Modulen erforderlich. [LAN15, S. 59–60]

Nach Landherr wird die Definition der Module vorgenommen hinsichtlich: „

- der technischen Funktion wie Montageanforderungen,
- der Kundenforderungen wie funktionale oder designtechnische Individualisierungsmöglichkeiten,
- des Austauschs zu Instandhaltungs-, Aufwertungs- oder Recyclingzwecken,
- der Adaptionmöglichkeiten, beispielsweise zur Anpassung des Flexibilitätskorridors,
- der separaten Qualitäts- oder Funktionsprüfung,
- der Abgrenzung fixer und veränderlicher Produkt- und Montagebereiche,
- der Organisationsstruktur oder
- des Fremdbezugs funktionaler Einheiten“ [LAN15, S. 60].

Aus diesen Grundsätzen wird eine individuelle Modularisierungsstrategie abgeleitet. Die definierten Module verfügen über eine eindeutige Beschreibung der individuellen Verantwortlichkeit zur Erfüllung der Gesamtfunktion des Systems sowie ihrer Schnittstellen. Dies ermöglicht die Anwendung von Konfigurationskonzepten und eine flexible Integration einzelner Module zu einem funktionsfähigen und den definierten Zielen entsprechenden Gesamtsystem. [LAN15, S. 59–60]

Prinzipien zur Integration der Module

Gemäß Landherr kann das Zusammenführen von Modulen des Produkt- und Montagesystems zu einem übergeordneten, funktionsfähigen System als Integration bezeichnet werden. Hiermit ist keine direkte physikalische Verbindung von Gegenständen wie Produktkomponenten und Montageressourcen gemeint, sondern eine modellbasierte Beschreibung des Gesamtsystems mit den Modulen und deren Wechselbeziehungen. Dies wird auch als eine indirekte Integration bezeichnet. Die Integration kann als ein Zusammenfügen als Kontrast zur Modularisierung im Sinne des Zerlegens definiert werden. [LAN15, S. 17]

Zwischenfazit

Um ein wandlungsfähiges und angepasstes Montagesystem zu erhalten, müssen die wesentlichen Wandlungsbefähiger bei der Systemplanung gründlich berücksichtigt werden. Grundlage ist eine klare Definition der Anforderungen und eine Systemanalyse. Darauf aufbauend erfolgt anhand eines Vorgehensmodells ein Systementwurf und anschließend die technische Realisierung des Montagesystems. Hierzu wurden verschiedene Ansätze aus der Softwareentwicklung, Mechatronik und des klassischen Maschinenbaus vorgestellt. Sie eint die Untergliederung der zu erfüllenden Gesamtverantwortlichkeit in Teilverantwortlichkeiten bzw. -funktionen. Diese werden durch Einzelmodule erfüllt, die interdisziplinär entwickelt werden. Konfigurationskonzepte werden benötigt, um eine flexible Modulintegration sowie eindeutige Beschreibungen und Schnittstellen der Module ermöglichen

Zur Implementierung dieser Prinzipien werden modulare und objektorientierte Ansätze der Anlagensteuerung gebraucht, welche im nächsten Kapitel vorgestellt werden.

2.3 Modulare und objektorientierte Anlagensteuerung

2.3.1 Relevante Systemarchitekturen

Um Modularität als Grundlage für die benötigte Wandlungsfähigkeit in der Anlagensteuerung sicherstellen zu können ist eine softwareseitige Unterstützung notwendig [MIC10]. Architekturmuster erlauben, die bisher übliche, starre Signalorientierung durch flexiblere Strukturen zu ersetzen [DÜR17a, S. 62–63]. Die detaillierte Strukturierung erfolgt mittels sogenannter Entwurfsmuster. Entwurfs- und Architekturmuster beeinflussen in einem frühen Stadium der Entwicklung die Flexibilität einer Software. (Vgl. [GOL11, S. 671-672; 826-827]) Im Folgenden werden daher drei relevante Architekturmuster erläutert.

Agentenbasierte Architekturmuster

Unter Agenten versteht man autonom agierende Softwareprogramme, welche mit Hilfe von weiteren Agenten mit ihrer Umwelt interagieren. Somit sind agentenbasierte Systeme in der Technik vor allem für parallel ablaufende Vorgänge mit hoher Dynamik bei dezentraler Steuerung geeignet. (Vgl. [ABE16, S. 13; HEH16; VOG15b])

In Abbildung 2.9 wird die Funktionsweise eines Agentensystems dargestellt.

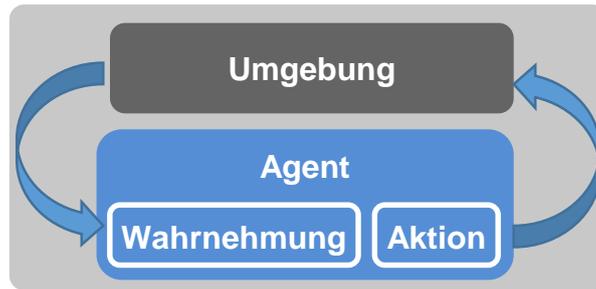


Abbildung 2.9: Agentensystem nach [WOOL 12, S. 16]

In den meisten Anwendungsfällen hat ein Agent keine vollständige Kontrolle über die komplette Umgebung, er beeinflusst daher einen Ausschnitt seiner Arbeitsumgebung. Einem Agenten stehen verschiedene Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung um Aufgaben basierend auf spezifischen Umgebungseinflüssen lösen zu können. Dadurch ist nicht sichergestellt, dass eine vom Agenten durchgeführte Aktion in einer anscheinend identischen Umgebung zu gleichen oder geplanten Ergebnissen führt. Dazu haben Agenten in der Regel mehrere Möglichkeiten, um das geplante Ziel zu erreichen, jedoch ist nicht jede Aktion für den Zustand der vorliegenden Umgebung geeignet. Die Summe aller Möglichkeiten beschreibt die Fähigkeit eines Agenten. Kernaufgabe eines Agenten ist es daher eine entsprechende Aktion auf Basis des vorliegenden Umgebungszustandes auszuwählen. Dafür ist es in einem agentenbasierten System erforderlich, neben den Agentenmodellen auch Modelle für Informationsflüsse und Umgebungen zu implementieren, auf die die Agenten Einfluss haben. (Vgl. [BE14, S. 389; WOO12, S. 16])

Agentenorientierte Ansätze stellen einen Lösungsansatz dar, um Anlagenautomatisierungen zu flexibilisieren. Neue Komponenten können schnell, kontrolliert und projektfrei in die Anlage implementiert werden. Zusätzlich werden technische Realisierung und Softwarestruktur voneinander entkoppelt, was die Flexibilität und die Wandelbarkeit eines Produktionssystems erhöht. Durch das Architekturmuster wird zudem ein hohes Maß an Skalierbarkeit erreicht. Im Gegensatz zu serviceorientierten oder brokerbasierten Architekturen werden beim agentenbasierten Ansatz keine expliziten Dienste definiert. Die Systemteilnehmer kennen die Dienste der anderen Elemente, während der Aufgabenausführung ist daher keine erneute Suche und Zuordnung der Dienstleister nötig. Der Ansatz unterstützt die einfache Integration von bestehenden Anlagen oder Anlagenteilen in ein übergeordnetes Steuerungssystem. (Vgl. [BE14, S. 385–389; EPP13, S. 108–109; FRA13, S. 4])

Bei der Verwendung von Multi-Agenten-Systemen sind jedoch Synchronisationen und klar definierte Interfaces erforderlich. Zudem muss sichergestellt werden, dass die Daten der verschiedenen Agenten konsistent sind. Ebenso muss durch die Verteilung der Agenten bei der Entwicklung auf die Performance des Gesamtsystems geachtet werden. (Vgl. [FRA13, S. 4; MIC10; WOO12, S. 307–309])

Servicebasierte Architekturmuster

Unter einer servicebasierten Architektur (englisch: Service Oriented Architecture kurz SOA) wird ein Gestaltungsparadigma verstanden, welches beschreibt, wie Organisationen, Menschen und Systeme Dienste (eng: Services) bereitstellen und nutzen, um Ergebnisse zu erzielen. Der Ansatz findet breite Verwendung, so basiert das Referenzarchitekturmodell RAMI4.0 als strukturiertes Beschreibungsmodell für Industrie 4.0 ebenfalls auf einer serviceorientierten Architektur. [DIN 91345]

Der servicebasierte Ansatz ermöglicht ein einfach skalierbares, agiles und flexibles System. Die geschäftsprozessorientierte Sicht eines Unternehmens soll direkt auf die Architektur eines Datenverarbeitungssystems abgebildet werden [GOL11, S. 874]. Dabei wird nicht berücksichtigt, wie einzelne Aufgaben gelöst werden, sondern welche Tätigkeiten zur Erfüllung der Aufgabe erforderlich sind [LIN16, S. 3–4]. „Dazu bieten die einzelnen mechatronischen Funktionseinheiten, vom Feldgerät bis zur Modulebene, ihre Funktionalitäten in Form von Diensten über einheitliche Schnittstellen an.“ [DÜR17a, S. 63] Um aus der Menge aller Dienste in einem System eine gewünschte Funktionalität zu erhalten, müssen diese komponiert werden. [DAN14]

„Eine wesentliche Eigenschaft einer SOA ist die lose Kopplung, das bedeutet, dass alle Dienste unabhängig voneinander ihre Funktionalität ausüben. Der Aufruf eines oder mehrerer Dienste deckt einen Anwendungsfall ab. Dies hat zur Folge, dass bei einer Anlagen-Rekonfiguration nur die Komposition der Dienste angepasst werden muss, ein Eingriff in die internen Implementierungen der einzelnen Dienste aber nicht erforderlich ist.“ [DÜR17a, S. 62–63] Hierdurch wird ein hoher Grad an Modularität und Wiederverwendbarkeit gewährleistet, was die Rekonfiguration von Anlagen erheblich vereinfacht. [DAN14]

Werden Dienste komponiert, unterscheidet man zwischen horizontaler und vertikaler Komposition. Die horizontale Komposition entspricht einer Kette von Diensten, welche nacheinander aufgerufen werden und wird auch als Choreographie bezeichnet. Hierbei nutzt jeder nachfolgende Dienst den Output des vorherigen. Eine vertikale Komposition, auch als Orchestrierung bezeichnet, bedeutet, dass ein Dienst intern auf andere Dienste zugreift, um seine Aufgabe zu erfüllen. Als Mischform existiert eine hybride Komposition. [ABE16, S. 17; MAS07, S. 106]

Bei der Komposition von Diensten, bezeichnet man den anbietenden Teil als Anbieter (Provider) und den nutzenden Teil als Konsument (Consumer). Um Dienste einer entsprechenden Aufgabe zuzuordnen (Matching), müssen die Dienste aller Anbieter zentral registriert werden. Dies geschieht über eine Dienst Registrierung (Service Registry), in welcher alle verfügbaren Dienste von den Anbietern mit ihren Eigenschaften veröffentlicht werden. Konsumenten erfragen bei der Registrierung den Anbieter, wenn sie einen Dienst konsumieren wollen. Durch die Vermittlung über die Dienst Registrierung erfolgt eine lose Kopplung zwischen den Teilnehmern, und Dienste sind austauschbar. Anschließend kontaktieren die Dienst Konsumenten direkt den Dienst An-

bieter, um dessen Dienst in Anspruch zu nehmen. Jeder Dienst kann unabhängig aufgerufen werden, da Dienste abgeschlossene Einheiten sind. [GOL11, S. 874–878; MAS07, S. 106-107; 283]

Der grundlegende Aufbau ist in Abbildung 2.10 zu sehen

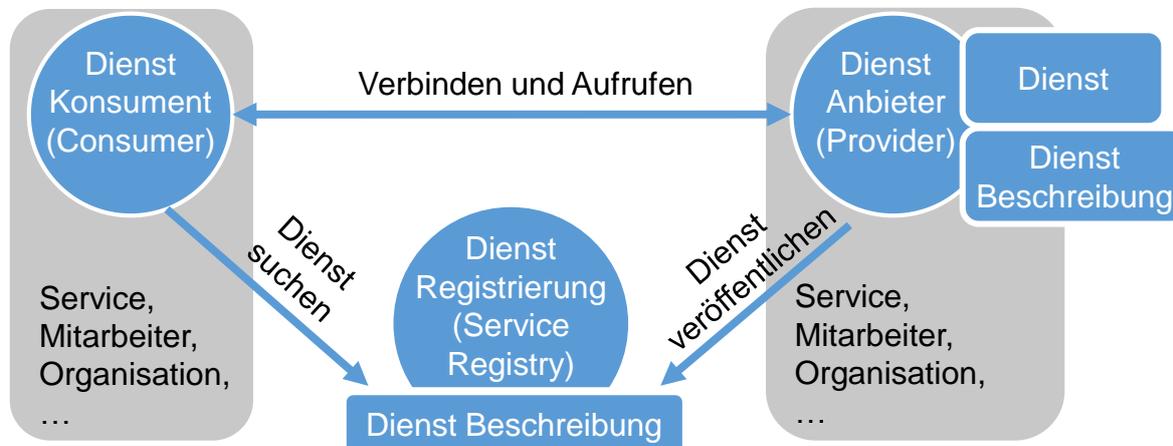


Abbildung 2.10: Aufbau der Servicebasierte Architektur

Bei der Implementierung eines Dienstes wird insbesondere auf dessen Verfügbarkeit und Stabilität Wert gelegt, da ein Dienst nach der Validierung in seiner Implementierung nicht mehr geändert werden soll. [LIN16, S. 8–11].

Eine SOA-Architektur löst Punkt-zu-Punkt Verbindungen zwischen den Systemelementen auf. Dies wird unter anderem durch die Standardisierung von Schnittstellen ermöglicht. Mit der Auflösung von starren Verbindungen werden dynamische Bindungen von Diensten während der Laufzeit ermöglicht. Dies steigert die Flexibilität, ebenso erfolgt durch die Kombination von Diensten eine Reduzierung der Systemkomplexität. Jedoch erzeugen zu granulare Dienste sehr komplexe Strukturen und die Kommunikation erweist sich als aufwendig. [GOL11, S. 874–878]

Brokerbasierte Architekturmuster

In SOA ist der zur Dienst Komposition erforderliche Wechsel von einem Dienst Anbieter zum nächsten zeitaufwendig und mit komplizierten Matching-Methoden verbunden. Der Broker-Ansatz stellt eine Erweiterung von SOA dar, welche dieses Problem lösen soll. Der Broker ist ein Softwareteil, welcher dafür zuständig ist, Anbieter an Konsumenten zu vermitteln. [MAS07, S. 143–145] Hierbei übernimmt er leitende Funktionen im Aufbau einer Infrastruktur und der Kommunikation zwischen Systemteilen.

Das Broker-Muster entkoppelt die Verbindungen der Teilnehmer durch eine Vermittlerschicht. Sowohl Dienstleister als auch Konsumenten kommunizieren über den Broker (siehe Abbildung 2.11). Dazu kann das Systemverhalten in zwei Phasen unterteilt werden, in die Anmeldung und den Dienstaufruf. [GOL11, S. 865–869]

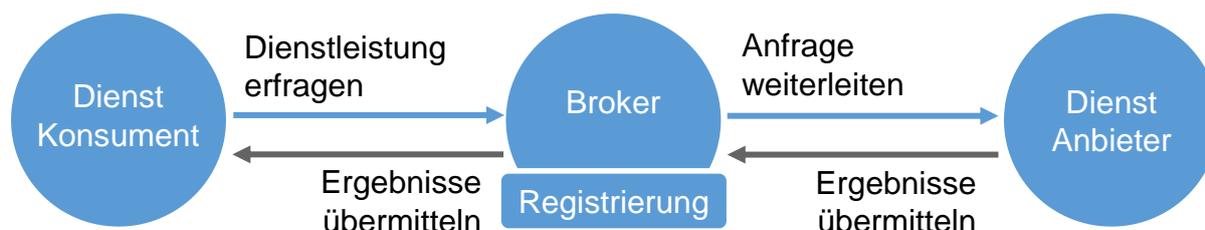


Abbildung 2.11: Broker Architektur

Damit eine Koordinierung der Kommunikation erfolgen kann, melden sich alle Teilnehmer bei dem Broker an. Konsumenten müssen also lediglich den Broker kennen, um Dienste in Anspruch zu nehmen. Durch dieses Architekturmuster können Konsumenten und Anbieter dynamisch ausgetauscht werden und sehr große Netzwerke werden ermöglicht. Beide Elemente benötigen nur Kenntnisse über den Broker und die eigentlichen Teilnehmer bleiben unbekannt. Die einzelnen Komponenten können auf verschiedenen Plattformen realisiert werden. Da die komplette Kommunikation des Netzwerkes über den Broker stattfindet, stellt dieser einen Engpass dar. Zusätzlich gestaltet sich der indirekte Aufruf über den Broker komplizierter und die Performance erweist sich gegenüber der von Direktzugriffen als unterlegen [GOL11, S. 865–869].

Zusammenfassung und Bewertung

Um ein flexibles und wandlungsfähiges Systemkonzept umzusetzen, bedarf es einer Steuerungsarchitektur, welche diese Eigenschaften unterstützt und auf einer entsprechenden Hardware implementierbar ist. Die drei grundlegenden vorgestellten Architekturmuster werden im Folgenden hinsichtlich der Nutzbarkeit zur Steuerung einer Anlage als Subsystem 3. Ordnung (Vgl. Kapitel 4.2) unter Nutzung einer speicherprogrammierbaren Steuerung in Abbildung 2.12 bewertet.

Softwarearchitektur				
Bewertungskriterien	Serviceorientierte Architektur	Brokerbasierte Architektur	Multiagentensysteme	
Performance	●	◐	◑	
Dynamik	◐	●	●	
Modularität	●	●	◐	
Rekonfigurierbarkeit	◐	◐	●	
Komplexität in Systemausführung	◐	◐	●	
lose Kopplung	◐	●	◐	● vollständig
Umgebungsberücksichtigung	◐	◐	●	◐ überwiegend
Wiederverwendbarkeit	◐	◐	◐	◐ teilweise
Reproduzierbarkeit	●	●	○	◐ eingeschränkt
Kommunikation/Schnittstellen	●	●	◐	○ nicht erfüllt

Abbildung 2.12: Bewertung der Softwarearchitekturen

In serviceorientierte Architekturen müssen Dienste entsprechend der Anfragen von Consumern gefunden und zugeordnet werden, um Aufgaben zu bearbeiten. Dieses

Vorgehen verlangt Rechenkapazität und die Suche und Zuordnung benötigt eine gewisse Zeitdauer. Da jeder Consumer diese Suche und Zuordnung zu einem Provider selbst vornimmt, ist die Performance gut, das zeitintensive Vorgehen verringert jedoch die Dynamik. Die Architektur ist durch diesen Aufbau sehr modular. Durch das Komponieren verschiedener Dienste und das direkte Kommunizieren miteinander entsteht eine hohe Komplexität. Umfangreiche Aufgaben müssen unter Umständen von mehreren Providern für einen Consumer ausgeführt werden. Um eine SOA zu rekonfigurieren, müssen neue Dienste dem System hinzugefügt werden. Sind diese Dienste und die ausführenden Module bereits vorhanden, ist der Aufwand gering, was die Wiederverwendbarkeit begünstigt. Der Aufwand zur Neuerstellung der Module ist höher und die Systemkompatibilität muss berücksichtigt werden. Weiterhin zeichnet sich die SOA durch eine lose Kopplung aus. Consumer und Provider sind nur durch die Kommunikation miteinander verbunden. Eine Berücksichtigung der Umgebung findet in dieser Architektur bei der Bearbeitung von Aufgaben nicht statt, kann aber unter zusätzlicher Verwendung von Ontologien implementiert werden. Die Kommunikationsstruktur ist ein Vorteil einer serviceorientierten Architektur. Schnittstellen müssen nur so definiert sein, dass Dienste, welche miteinander kommunizieren müssen, dies auch können. Eine konsistente Kommunikationsschnittstelle über das gesamte System hinweg ist nicht zwingend erforderlich. Die Methoden eines Dienstes sind prozedural und nur so viel von der Umgebung abhängig, wie vom Entwickler vorgesehen. Hiermit ist das Systemverhalten voraussehbar und reproduzierbar.

Brokerbasierte Architekturen gehen aus der SOA hervor. Durch die zentrale Vermittlung von Consumern an Provider mittels Broker wird eine Verbesserung in dem Punkt Dynamik erreicht, Consumer finden die passenden Provider sicherer und schneller. Der Broker ist zudem für die Kommunikation der einzelnen Elemente miteinander verantwortlich. Somit steigt der Rechenaufwand, die Performance verschlechtert sich also leicht. Durch das Aufbrechen der direkten Kommunikation wird auch die Kopplung der einzelnen Elemente weniger strikt. In den Punkten der Modularität und der Rekonfigurierbarkeit bleibt das Konzept durch die Verwendung eines Brokers unverändert, ebenso die Umgebungsberücksichtigung, Wiederverwendbarkeit und Kommunikation. Durch die Vermittlung über einen zentralen Broker wird die Komplexität nicht erhöht und die Reproduzierbarkeit nicht verändert.

Die Architektur der Multiagentensysteme bietet innerhalb eines Agenten eine sehr gute Dynamik zu Lasten der Systemperformance. So kann in MAS jeder Agent aufgrund der Kenntnis der Fähigkeiten anderer Agenten diese kontaktieren auf die angebotenen Fähigkeiten zurückgreifen. Durch diese Integration wird die Modularität etwas verschlechtert, allerdings bleibt die Kapselung von Funktionalitäten in einzelne Softwaremodule erhalten. Da Agenten die Funktionalitäten anderer Agenten kennen und die Schnittstellen streng definiert sind, ist eine Rekonfiguration eines bestehenden Systems mit bereits vorhandenen Agenten sehr einfach. Somit ist auch eine Wiederverwendbarkeit bereits entwickelter Agenten gegeben, wenn die Schnittstellen der Systeme konsistent sind. Die direkte Kommunikation der einzelnen Agenten untereinander

und die schwer vorhersagbare Reaktion eines MAS aufgrund der Kenntnis der Umgebung erhöht die Komplexität. Durch die direkte Kommunikation existiert eine Kopplung der Elemente miteinander. Aufgrund der Reaktion von Agenten auf ihre Umgebung und der damit verbundenen Auswahl eines Antwortverhaltens sind diese Systeme hinsichtlich der Wiederverwendbarkeit am stärksten zu beurteilen. Allerdings ist die Vorhersehbarkeit eines Multiagentensystems nicht gegeben. Die Aufgabebearbeitung wird durch die Umgebung beeinflusst, hierdurch ist ein reproduzierbares Verhalten nicht garantiert. Je nach Ausprägung der Umgebungsvariablen entscheiden Agenten für den Benutzer nicht einsehbar, wie auf die Umgebung gewirkt wird. Dies hat vor allem Nachteile für die Sicherheit und Reproduzierbarkeit einer Anlagensteuerung.

Fazit

Multiagentensysteme bieten ein gutes Konzept, um auf Umgebungsbedingungen variabel reagieren zu können und zeichnen sich durch eine hohe Dynamik aus. Allerdings ist hierbei die Performance ein nachteiliger Faktor. Je mehr Agenten in einem System agieren, desto höher wird der Rechenaufwand. Dieser Punkt ist maßgeblich, wenn die Implementierung auf einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) angestrebt wird, da die verfügbare Rechenkapazität solcher Steuerungen schnell erschöpft ist. Das wichtigste Kriterium ist die Reproduzierbarkeit des Systemverhaltens, insbesondere um die Sicherheit des Systems bei der Zusammenarbeit mit Menschen gewährleisten zu können. Hierzu muss das System- und Antwortverhalten vorhersehbar sein. Diesen Punkt können Multiagentensysteme nicht erfüllen.

Zur Umsetzung der angestrebten Methodik dieser Arbeit wird daher ein Konzept gewählt, welches auf einer serviceorientierten Architektur mit Brokerfunktionalitäten beruht.

2.3.2 Konzepte zur Anlagenmodellierung und -steuerung

Um Modularität und Wiederverwendbarkeit in der Steuerungsprogrammierung zu erreichen werden objektorientierte Ansätze eingesetzt, um die herkömmliche ablaufbasierte Programmierung von speicherprogrammierbaren Steuerungen zu ersetzen. In der Automatisierungstechnik ist es bisher nur unzureichend gelungen Module zu definieren und Wiederverwendung in der Breite zu erreichen. [VOG09, S. 13; VOG15a] In der Norm IEC61131-3 sind objektorientierte Programmieraspekte enthalten, diese sind jedoch in der praktischen Anwendung bisher wenig gebräuchlich [IEC 61131; VOG15a].

Im Folgenden werden einige relevante Ansätze genannt, welche das Ziel einer modularen, objektorientierten und flexiblen Steuerungsprogrammierung haben. Zu Beginn wird als Basis die Unified Modeling Language eingeführt, welche zur objektorientierten Modellierung des Steuerungsablaufs genutzt werden kann.

Unified Modeling Language

Für die Entwicklung von objektorientierten Systemen bieten sich graphische Notationen an. Ziel ist, durch eine graphische Darstellung den Entwurf von komplexen, objektorientierten Systemen zu standardisieren und eine allgemeinverständliche Dokumentation zu erhalten [GOL11, S. 317]. Durch die Harmonisierung von Modellierungssprachen und die Integration verschiedener Konzepte stellt die Unified Modeling Language (kurz UML) eine einheitliche grafische Sprache dar, mit der objektorientiert modelliert werden kann und mit der sich statische, strukturelle und dynamische Aspekte von Systemen abbilden lassen [GOL11, S. 317,321; RUM11, S. 5–6]

Das wichtigste Element der UML sind Klassen, welche zur Kapselung der Daten beitragen. In ihnen werden die Gegenstände der Realität abgebildet. Gemäß dem Ansatz der Objektorientierung verfügen Klassen über Attribute und Operationen, Objekte über Attribute und Methoden. In Abbildung 2.13 wird ein Beispiel einer Klasse in UML-Notation gezeigt.

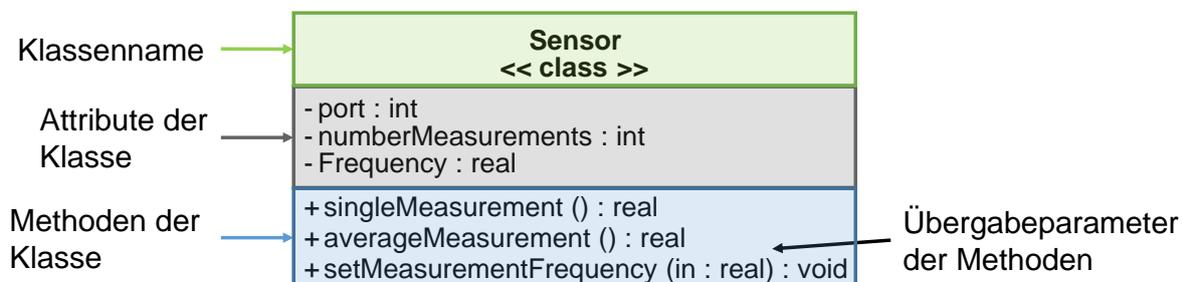


Abbildung 2.13: UML-Darstellungsbeispiel

In diesem Beispiel wird ein Sensor über einen Port („port“), eine Anzahl von Messungen („numberMeasurements“) definiert und eine Messfrequenz („frequency“). Hinter den genannten Attributen wird deren Datentyp angegeben (int/real). Dem Sensor kann über die Methode „setMeasurementFrequency“ eine Messfrequenz zugewiesen werden. Dafür benötigt die Funktion einen Übergabewert vom Datentyp real. Anhand des void wird definiert, dass die Funktion bei einem Aufruf keinen Datentyp zurück liefert.

Um die Elemente in UML in Beziehung zu setzen, enthalten die Diagramme Knoten (Klassen, Objekte o.ä.) welche über Kanten in Beziehung stehen. Somit lassen sich in UML-Diagrammen Strukturelemente, statische Beziehungen und dynamische Verhaltensweisen abbilden [GOL11, S. 320–321]. Um unterschiedliche Beziehungen, Sichtweisen und Teile eines modellierten Systems darzustellen, existieren in UML verschiedene grafische Darstellungsmethoden, z.B. Klassendiagramme oder Sequenzdiagramme. [RUM11, S. 16,211]

AML – Automation Modeling Language

Während des Entwurfs eines Produktionssystems werden Ingenieure aus verschiedenen Bereichen einbezogen. Diese führen individuelle Entwurfsaktivitäten durch und nutzen unterschiedliche Systeme zur Erstellung, Nutzung und Wartung des Produktionssystems. Medienbrüche und Dopplungen stellen ein großes Problem dar, da es keine geeigneten Instrumente für einen Datenaustausch zwischen unterschiedlichen

Systemen gibt und ein erheblicher Aufwand zur Datenübertragung entsteht. Um dies zu vermeiden, soll ein verlustfreier Datenaustausch entlang der kompletten Entwurfswerkzeugkette ermöglicht werden. [LÜD17, S. 214]

Mit dem Ziel die Engineeringkosten zu senken wurde AutomationML entwickelt. AutomationML ist ein XML-basiertes Datenformat zum neutralen Speichern von interdisziplinären Planungsdaten. Das Datenformat umfasst dabei keine Schnittstellen zu proprietärer Software oder zur Datenübertragung. Zur Beherrschung der vorliegenden Komplexität verwendet AutomationML Objektorientierung. Diese ermöglicht eine hierarchische Abbildung der Struktur oder Topologie einer Anlage. Die Anlagentopologie beschreibt die Anlage als hierarchische Struktur von Anlagenobjekten [HER08]. Die realen Elemente eines Produktionssystems werden in dem Dateiformat über Objekte, ihre auszutauschende Informationen durch die spezifischen Objekteigenschaften gespeichert. Dabei kann der Detaillierungsgrad variiert werden. [LÜD13, S. 6–7]

In AutomationML können Informationen bezüglich des Verhaltens und der Logik, Geometrie und Kinematik sowie Informationen zur Struktur, bezüglich Attributen, Schnittstellen und Relationen gespeichert werden. Zur Speicherung dieser Daten werden bereits existierende Datenformate verwendet. Für Verhaltens- und Logikinformationen wird das PLCOpen XML Format benutzt, welches durch die IEC 61131-3 festgelegt ist (Vgl. [IEC 61131]). Die Beschreibung von Geometrie und Kinematik erfolgt über das Datenformat Collada und Informationen zur Topologie über das in der IEC 62424 standardisierte CAEX Dachformat (Vgl. [DIN 62424]). Durch die Bündelung von Geometrie, Kinematik und Verhaltensdaten wird eine universelle Überführung in Simulationssoftware vereinfacht. (Vgl. [HIR14a, S. 4; LIP13, S. 30–31; LÜD13, S. 8])

AutomationML verwendet Bibliotheken und eine sogenannte InstanceHierarchy, mit der eine hierarchische Abbildung der Anlagenstruktur erfolgt. Den Anlagenobjekten werden Rollen und Funktionen innerhalb des Produktionssystems über die sogenannte SystemUnitClassLibraries und RoleClassLibraries zugeordnet. Die Rolle eines Anlagenobjektes beschreibt eine abstrakte Funktionalität im Gesamtsystem ohne eine weitere Spezifikation der technischen Umsetzung. Die RoleClassLibrary ermöglicht demnach eine herstellerunabhängige Beschreibung der Objektbedeutung im Gesamtsystem. Bei der Zuordnung kann auf bereits vordefinierte Rollen zurückgegriffen werden. Die Struktur der RoleClassLibrary ist in Abbildung 2.14 dargestellt.

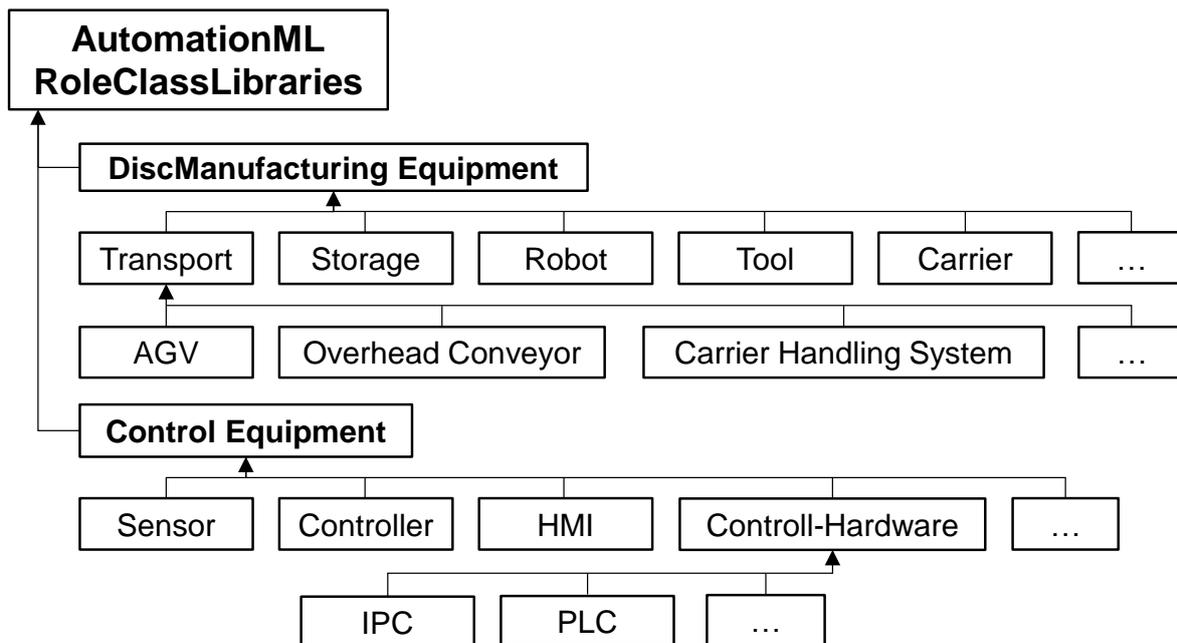


Abbildung 2.14: Struktur der RoleClassLibrary in AutomationML [AUT14]

Eine Beschreibung der technischen Ausprägung des Anlagenobjektes erfolgt in den SystemUnitClassLibraries. Die Schnittstellen der Anlagenkomponenten werden über InterfaceClassLibraries definiert. Durch Interfaces und Relationen können Objekte unabhängig ihrer hierarchischen Anordnung in Verbindung gesetzt werden. (Vgl. [LÜD13, S. 7; SCH13])

AutomationML wurde bereits in verschiedenen Anwendungsbereichen implementiert. Beispielsweise verwendet der Automobilhersteller Daimler das Datenformat in Produktionsplanungsprozessen. Unter anderem wurden eine Software für automatische Roboter Bahnplanungen (Pathfinder), eine Visualisierungssoftware für die Fabrikplanung (VEO factory) und eine Software für die virtuelle Inbetriebnahme entwickelt. [HIR14b, S. 5]

Robot Operation System (ROS)

Das Open Source Framework Robot Operation System - ROS stellt eine modulare, sprachen- und plattformunabhängige Architektur für verteilte Steuerungen dar. ROS-basierte Steuerungssysteme bestehen aus verschiedenen, über ein peer-to-peer Netzwerk kommunizierende und kooperierende Prozesse. Das Framework bietet verschiedene Pakete für typische Simulations- und Steuerungsaufgaben wie bspw. die Bahnplanung an. [QUI09] Die Entwicklung von komplexen Steuerungsaufgaben gilt aufgrund des benötigten Fachwissens über die verwendeten Pakete sowie der Konfiguration als schwer. [HOO17]

Ansatz Plug & Produce und Secure Plug&Work

„Der Begriff „Plug & Produce“ (PnP) bezeichnet die Fähigkeit eines technischen Systems, sich selbstständig konfigurieren zu können. Die Kernaufgabe bei der Realisierung von PnP besteht darin, bislang notwendige manuelle Konfigurationsschritte durch

intelligente Assistenzsysteme vornehmen zu lassen, welche nicht auf Expertenwissen angewiesen sind.“ [DÜR17a, S. 70]

Das Prinzip basiert auf „der semantischen Beschreibung der innerhalb einer Produktionsanlage vorhandenen Funktionalitäten. Jeder Dienst registriert sich und seine angebotene Funktionalität dabei in einem zentralen Webservice-Verzeichnis. Demgegenüber steht ein zu fertigendes Produkt, für welches eine abstrakte Prozessbeschreibung eine Abfolge der für die Produktion notwendigen Prozessschritte angibt. Als gemeinsame Grundlage für Prozess- und Dienstbeschreibungen dient eine systematisch entwickelte Ontologie, in welcher die Funktionalitäten, die durch die Dienste einer Produktionsanlage ausgeführt werden können, durch Klassen repräsentiert werden.“ [DÜR17a, S. 64]

Secure Plug & Work hat ähnlich wie Plug & Produce das Ziel einer automatischen Anpassung der Anlagensteuerung jedoch unter der Berücksichtigung von sicherheitsrelevanten Aspekten. Es wird insbesondere eine sichere, signierte, authentifizierte und gezielte Verbreitung von Anlagenänderungen betrachtet. Eine Komponentenbeschreibung erfolgt über das AutomationML Format. [SAU14]

Zusammenfassung

Zum Betreiben eines effizienten und wandlungsfähigen modularen Montagesystem sind Steuerungsarchitekturen, Beschreibungen sowie Datenformate notwendig. Hierzu wurden drei Steuerungsarchitekturtypen beschrieben und verglichen. Mit UML existiert eine einheitliche Modellierungssprache zur Darstellung und Beschreibung des Steuerungssystems. AutomationML bietet die Möglichkeit durchgängiger Datenformate ausgehend von der Konstruktion bis zur technischen Realisierung einer Anlage. Plug & Produce stellt einen Ansatz dar, um anhand der erstellten Planungsdaten eine automatisierte Anlagen(re)konfiguration ohne manuellen Eingriff zu ermöglichen.

2.4 Fazit

Um den Ansprüchen einer modernen Fahrzeugproduktion gerecht zu werden sind wandlungsfähige und angepasste Montagesysteme notwendig. In Kapitel 2.1 wurden die wesentlichen Begriffe hierzu eingeführt. Ebenfalls wurden die Grenzen vollautomatisierter Lösungen und deren negative Eigenschaften erläutert. Um angepasste Automation zu ermöglichen, müssen die Aufgaben Mensch und Automatisierungssystem gemäß ihren spezifischen Fähigkeiten zugeteilt werden, relevante Prinzipien wurden aufgezeigt.

In Kapitel 2.2 wird beschrieben, mit welchen Methoden die Anforderungsdefinition und Systemanalyse des zu planenden automatisierten Montagesystems auf Basis der zugeteilten Aufgaben durchgeführt werden kann. Darauf aufbauend folgen ein Systementwurf und die anschließende technische Realisierung. Ein interdisziplinärer Ansatz ist notwendig, um das mechatronische Gesamtsystem mit einer modularen Grund-

struktur zu entwickeln. Basis hierzu bilden die vorgestellten Methoden und Vorgehensmodelle. Modularität ist ein wesentlicher Bestandteil und Wandlungsbefähiger, die Grundlagen und Definition mechatronischer Module wurden hierzu beschrieben.

Zur Implementierung, dem Betreiben und der (Re-)Konfiguration eines solchen Systems sind Systemarchitekturen, Konfigurationskonzepte und durchgängige Datenformate notwendig welche in Kapitel 2.3 vorgestellt und bewertet wurden.

Im folgenden Kapitel 3 werden bestehende Forschungsansätze aufgezeigt, welche im Forschungsfeld der Thematik dieser Arbeit bestehen und entsprechend ihrem Erfüllungsgrad der gestellten Forschungsfragen bewertet.

3 Bestehende Forschungsansätze und Applikationen

In ersten Teil dieses Kapitel werden relevante Forschungsansätze und Veröffentlichungen im Themenfeld der vorliegenden Arbeit dargestellt. Dies erfolgt ausgehend von der Planung wandlungsfähiger Systeme über die Prozessplanung und Aufgabenzuordnung bis zum Engineering und der Steuerung modularer Produktionsanlagen. Im Anschluss wird ein Abgleich der vorgestellten Ansätze mit der Zielstellung dieser Arbeit durchgeführt. Zusätzlich werden bestehende praktische Anwendungen und Applikationen diskutiert.

Im zweiten Teil des Kapitels erfolgt die Vorstellung der Mensch-Roboter-Kooperation in der Automobilproduktion. Hierzu wird zunächst eine Übersicht der Unterteilung der Automobilproduktion in einzelne Bereiche und die jeweilige Nutzung der Robotik beschrieben. Anschließend werden die Ziele und Arten der MRK in der Automobilmontage vorgestellt und anhand von relevanten Beispielen illustriert.

Am Ende des Kapitels wird ein Fazit gezogen und bestehender Handlungsbedarf abgeleitet.

3.1 Ansätze in der Montage- /Anlagenplanung und Integration

3.1.1 Überblick über bestehende Forschungsansätze

Planungsmethoden für wandlungsfähige Montagesysteme

Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme

Eilers untersucht die Zusammenhänge zwischen potenziellen Wandlungstreibern (Produkt-, Stückzahl- und Montagetechnologieveränderung) und den zu gestaltenden Systemelementen [EIL15, S. 21;135]. Hierzu entwickelte er ein Referenzmodell, das die relevanten Sachverhalte skalier- und rekonfigurierbarer Montagesysteme abbildet. Zentral ist hierbei die Unterteilung des Gesamtsystems in Systemelemente, welche sich einfacher hinsichtlich der Wandlungstreiber anpassen lassen [EIL15, S. 58–59]. Eine Auflösung der Trennung zwischen Montageplanung und Systementwurf soll durch mehrere Hierarchieebenen im Modell erreicht werden. Dies soll eine ganzheitliche Betrachtung ausgehend von kompletten Montagesystemen zu einzelnen Prozessmodulen ermöglichen [EIL15, S. 62]. Es wird zusätzlich die Möglichkeit der Systemelemente beschrieben sich an potenzielle Wandlungstreiber anzupassen, also inwiefern sie skaliert oder rekonfiguriert werden können. [EIL15, S. 58–77]

Hauptfokus liegt auf dem Einsatz der eingeführten Methoden zur Darstellung des Vorgehens bei der Planung von Montagesystemen, um eine gesteigerte Anpassungsfähigkeit an mögliche Wandlungstreiber zu erreichen. Ergebnis der Planung sind einzelne Prozessmodule, welche flexibel ausgetauscht werden können und in ein Basismodul integriert sind. Rekonfigurierbarkeit wird erreicht durch eine variantenübergrei-

fende Nutzbarkeit des Basismoduls mit austauschbaren Prozessmodulen. Skalierbarkeit wird geschaffen, indem manuelle Tätigkeiten durch automatisierte Prozessmodule ausgetauscht werden. Eilers beschreibt keine explizite Vorgehensweise zur technischen Lösungsfindung und Implementierung, die beschriebenen Prozessmodule werden hinsichtlich technischer Ausprägung nicht näher spezifiziert. Ebenso wird kein Konzept zur steuerungstechnischen Umsetzung entwickelt. Kernpunkt ist Rekonfigurierbarkeit und Skalierbarkeit, der Gesichtspunkt der flexiblen, variantenspezifischen Änderung der durchzuführenden Montageaufgaben wird nicht betrachtet.

Entwurfsmuster für den Aufbau von Baukästen für das Funktionale Engineering

Buck beschreibt in seiner Arbeit die Erstellung von baukastenbasierten funktionalen Engineering Systemen. Durch Modularisierung und Wiederverwendung von mechatronischen Komponenten soll es ermöglicht werden, Maschinen und Anlagen variantengerecht zu konfigurieren und eine automatische Projektdokumentation zu erstellen [BUC15, S. 61]. Kernpunkte der Methodik sind das Identifizieren von Optimierungspotenzialen in bestehenden Baukästen und die Entwicklung mechatronischer Entwurfsmuster. Darauf aufbauen die Ausarbeitung von Konzepten firmenübergreifend wiederverwendbarer Basisbaukästen und die Unterstützung durchgängiger Engineering Prozesse [BUC15, S. 42–44]. Die Arbeit beschränkt sich dabei im Wesentlichen auf den Konstruktionsprozess einer Anlage. Die Implementierung und Steuerung wird nicht berücksichtigt.

Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration

Landherr will mit seiner Methodik die abgestimmte Adaption von Produkt- und Montagesystemen unterstützen [LAN15, S. 6]. Eine modellbasierte Vorgehensweise zur integrierten Konzeptualisierung, virtuellen Konfiguration und Auswahl geeigneter Systemlösungen wurde entwickelt [LAN15, S. 59]. Grundlage für die Konfiguration ist eine Modularisierung des Produktes und der zugehörigen Montageprozesse untergliedert nach unabhängigen, geschlossenen Funktionseinheiten, welche in der Summe die Gesamtfunktion erfüllen. Der Änderungsbedarf des Systems über seine Laufzeit durch Umfeld-, System- oder Moduländerungen wird identifiziert. Anschließend erfolgt eine virtuelle Produkt- und Montagekonfiguration. Diese umfasst drei Teilschritte. Zuerst werden auf Grundlage des bestimmten Änderungsbedarfs die notwendigen Adaptionsmaßnahmen ermittelt. Anschließend werden die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf das Gesamtsystem untersucht. Durch Auswertung der Konsequenzen der einzelnen Adaptionsmaßnahmen lassen sich im dritten Schritt valide Systemalternativen bestimmen. [LAN15, S. 120–121]

Landherr beschreibt somit die Möglichkeit einer modulbasierten Konfiguration, welche die relevanten Einflussfaktoren auf das Montagesystem miteinbezieht. Diese Konfiguration wird als Prozess beschrieben, welcher auf bestehende Informationen zurückgreift und diese für den Anwender aufarbeitet und visualisiert. Eine durchgängige Planung bis zur Implementierung und Steuerung der Anlage ist nicht enthalten.

Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserieohbau

Kiefer nutzt bei seinem Ansatz mechatronische Ressourcen- und Prozesselemente, die alle relevanten mechanischen, elektrischen und steuerungstechnischen Anlagen Daten zentral bündeln. Diese werden den am Planungsprozess beteiligten Fachbereichen in Form standardisierter, wiederverwendbarer Planungsobjekte zur Verfügung gestellt. Mithilfe der Planungsobjekte erfolgt eine vernetzte Entwicklung eines mechatronischen PPR Datenmodells (PPR: Produkt, Prozess, Ressource). Dieses Datenmodell wird genutzt, um standardisierte Arbeitsunterlagen und spezifische Steuerungsprogramme abzuleiten, weiterhin unterstützt es die virtuelle Inbetriebnahme. [KIE07, S. 137–138]

Kiefer beschreibt einen durchgängigen Planungsansatz durch Nutzung eines Datenmodells, welches über den gesamten Planungszyklus aber auch während des weiteren Lebenszyklus der Anlagen genutzt werden kann. Das Modell enthält eine Bibliothek an mechatronischen Ressourcen, welche zur Konfiguration einer Anlage genutzt werden. Ein Prozessmodell bestehend aus Aktivitäten, Transitionen sowie Alternativ- und Parallelverknüpfungen wird erstellt, um den Prozessablauf zu beschreiben. Die Teilschritte des Prozessmodells werden als Prozesselemente in ein SPS-Programmiersystem übernommen und bilden zusammen mit Datensätzen für die mechatronischen Ressourcen die Grundlage des Steuerungsprogramms.

Kiefer stellt keinen expliziten Modularisierungsansatz dar und nutzt kein abstraktes lösungsneutrales Planungsvorgehen auf Basis von Verantwortlichkeiten. Die zielgerichtete Anforderungsanalyse zur Bestimmung der benötigten Verantwortlichkeiten ist ebenfalls nicht enthalten. Die Prozessbeschreibung und die mechatronischen Ressourcen werden als Grundlage der Steuerungsprogrammierung genutzt. Ein Steuerungskonzept zur Implementierung wird nicht im Detail beschrieben.

Prozessplanung und Aufgabenzuweisung

Deuse, Roßmann et al. präsentieren einen Planungsansatz, der eine Planung eines angepassten Automatisierungssystems als Entscheidungsunterstützungssystem ermöglicht. Grundlage ist ein Internet Portal, welches den Prozessplaner als Kunden und den Automatisierungstechnikanbieter zusammenbringt. Die verfügbaren Robotikkomponenten werden vom Anbieter in einer Datenbank abgelegt. Sie werden anhand ihrer technischen Eigenschaften beschrieben (Leistung, Geschwindigkeit, Größe etc.). Der Prozessplaner als Kunde übergibt Prozessinformationen und wichtige Randbedingungen. Die Prozessbeschreibung basiert auf einer der MTM angelehnten Methode mit fünf Grundbewegungen (Hinlangens, Greifen, Bewegen, Positionieren, Loslassen). Auf dieser Grundlage wird das Potenzial zur Automatisierung der Prozesse bestimmt. In der zweiten Phase wird die Prozessbeschreibung mit den Fähigkeiten der Automatisierungskomponenten verglichen und geeignete Komponenten ausgewählt. Anschließend folgt ein Vorschlag für einen Prozessablauf mit den vorgeschlagenen Komponenten, passend zur Prozessbeschreibung. Der so gestaltete Prozess wird in einer 3-

D Simulation für den Nutzer bereitgestellt. Auf Basis der Simulation folgt eine Bewertung und evtl. Anpassungen. Am Ende erfolgt die Ableitung einer spezifischen Robotiklösung. [DEU14]

Die Methode stellt einen Ansatz dar, um aufgrund einer Prozessbeschreibung automatisiert eine Betriebsmittelauswahl und einen Automatisierungsprozess zu gestalten. Sie ist jedoch beschränkt auf Robotikanwendungen mit simplen Teilaufgaben. Die Ermittlung der Prozessbeschreibung und erforderliche Randbedingungen sind nicht näher ausgeführt. Es wird kein Implementierungs- und Steuerungskonzept vorgestellt.

Zur Planungsunterstützung werden fähigkeitsbasierte Methoden genutzt, um Aufgaben zielgerichtet zu beschreiben, und im Falle einer MRK an Mensch oder Roboter zuweisen zu können. Schröter, Verl et. al präsentieren einen Ansatz zur Beschreibung von Roboterbewegungen auf Basis von MTM-Blöcken ähnlich dem Planungsansatz von Deuse et. al (Vgl. [DEU14]). Diese werden zusätzlich mit Zeitinformationen versehen, welche aus den zugrundeliegenden Roboterparametern (Geschwindigkeit, Beschleunigung, Bewegungslänge etc.) ermittelt werden. Es ermöglicht eine Taktzeitbestimmung und zeitbasierte MRK-Prozessplanung. [SCH16a]

Backhaus entwickelte ein adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem auf Grundlage eines „Skill-basierten Informationsmodells“ [BAC16, S. 4]. Ziel ist die Generierung eines Anwendungsprogramms aus der abstrakten Aufgabenbeschreibung. Skills beschreiben vorhandene Ressourcen und können zur Erfüllung einer (Teil)Aufgabe kombiniert werden [BAC16, S. 78]. Durch ein hierarchisches Modell können ausgehend von einer Primärprozessebene bis zur Skill-Ebene Prozessbeschreibungen zunehmend detailliert dargestellt werden. Auf der Skill-Ebene entspricht dies einer Sequenz der Einzelskills. Auf der folgenden Parameterebene werden Koordinaten und Prozessparameter festgelegt, welche in der tiefsten Ebene in maschinenlesbaren Code übertragen werden. Dieser wird zur Ablaufsteuerung der Anlage genutzt. [BAC16, S. 104]

Michniewicz erweitert dieses Konzept durch die Möglichkeit, die Montageaufgaben und damit die benötigten Skills direkt aus einem CAD Modell abzuleiten. Die zu montierenden Baugruppen und Teile werden im CAD-Modell analysiert und ein Vorranggraph abgeleitet, zusätzlich werden weitere Teilvorgänge wie Zuführaufgaben miteinbezogen. Auf dieser Grundlage werden mögliche Prozessalternativen berechnet. Im CAD-Modell müssen zuvor manuelle Vorgaben gemacht werden, wie beispielsweise das zuerst zu montierende Teil oder die Montagerichtung. [MIC16]

Pedersen et al. stellen ebenso ein aufgabenorientiertes Programmierkonzept vor. Skills welche von Arbeitsbeschreibungen für manuelle Prozesse abgeleitet werden, werden genutzt, um einen mobilen Roboter mit einer aufgabenbasierten Programmiermethode zu programmieren. Die Skills werden von einem Programmierer angelegt und in einer Datenbank gespeichert. Es handelt sich dabei um einfache Arbeitsschritte zusammengesetzt aus primitiven Teilschritten (Beispielsweise Place-Object-Skill besteht

aus Ablageort detektieren, Roboter bewegen, Greifer öffnen). Die Programmierung erfolgt durch eine Auswahl und Sequenzierung der Skills. [PED16]

Johannsmeier und Haddadin beschrieben einen verwandten Ansatz. Sie verfolgen jedoch ein Multi-Agenten Prinzip, bei dem der Mensch und die Roboter als Agenten angesprochen werden. Das verwendete Framework besteht aus zwei Ebenen. Auf der höheren Ebene werden Aufgabensequenzen für jeden Agent bestimmt. Anhand von Kostenfunktionen welche die spezifischen Eigenschaften von Menschen und Robotern einbeziehen wird ein Optimum bestimmt und eine Zuordnung erfolgt. Die untere Ebene steuert die Aufgabenausführung. Die Aufgaben werden durch hierarchisch angeordnete Zustandsautomaten abgebildet welche das Roboterverhalten steuern. Diese Anordnung erlaubt es dem Robotersystem auf unvorhergesehene Einflüsse zu reagieren. [JOH17]

Die vorgestellten Forschungsansätze beschreiben, wie Montageaufgaben beschrieben werden können und darauf aufbauend der Prozessablauf gestaltet werden kann. Zumeist beschränken sich die Ansätze auf Robotik und vorgegebene Anlagenstrukturen. Überwiegend wird nur der Teilbereich der Aufgabenübertragung in einen Prozessablauf und nicht die technische Lösungsfindung berücksichtigt. Anlagenmodularisierung ist ebenfalls kein Kernpunkt der Beschreibung sondern wird vorausgesetzt.

Modulares Engineering von Produktionsanlagen

Fähigkeitsbasierte Planung modularer Montagesysteme

Kluge entwickelte eine Methodik zur Grobplanung von modularen Montagesystemen. Mithilfe einer Beschreibung sollen mehrere alternative Lösungen für eine Montageaufgabe konfiguriert werden. Dies geschieht durch eine für die Montageplanung angepasste Szenariotechnik. [KLU11, S. 11-12 ; 157]. Die Auswahl von Montageressourcen- und Prozessen erfolgt auf der Grundlage eines Fähigkeitsmodells. Dem Produkt werden hierzu die benötigten Montageprozesse zugeordnet, welche dann als Prozessablauf und Fähigkeitsfolge beschrieben werden. Montagesystemmodule bieten Montageressourcen, welche als prozessrelevante Module und aufgrund verfügbarer Fähigkeiten beschrieben werden. Die Konfiguration erfolgt dann über einen Fähigkeitsabgleich. Entsprechend der benötigten Fähigkeitsfolge werden aus einem Modulbaukasten passende Montageressourcen ausgewählt. [KLU11, S. 77–79]

Die Methode beschreibt ein Vorgehen zur Generierung möglicher Systemlösungen und eine Auswahl auf Grundlage von wirtschaftlichen und technischen Bewertungen. Ein Vorgehen zur Integration und Steuerung des Prozessablaufes ist nicht enthalten.

Wandlungsfähiges mobiles Montagesystem für den automotive Sektor

Der Ansatz von Weber beschreibt die Entwicklung und Konstruktion einer wandlungsfähigen mobilen Montageinheit unter Nutzung von Axiomatic Design (Vgl. [WEB15; WEB16]). Dafür werden die Wandlungsbefähiger als funktionale Anforderungen im Axiomatic Design Prozess definiert. Hinzu kommen allgemeine und technische Anfor-

derungen welche von relevanten Anspruchsgruppen (Entwicklung, Produktionsplanung etc.) festgelegt werden [WEB15]. Auf dieser Grundlage wurden mobile Montagemodule entwickelt. Der Aufbau basiert auf einem Lastmodul, eine rechteckige Stahlkonstruktion mit Rollen, welche sowohl Mitarbeiter als auch automatisierte Prozessmodule aufnehmen kann. Lastmodule können zusammengeschlossen und somit erweitert werden. Rekonfigurierbarkeit und Skalierbarkeit wird durch eine Erweiterung mit Materialzuführungen und zusätzliche Automation ermöglicht (z.B. automatisiertes Verfahren, Roboter statt manueller Prozess). [WEB16]

Die wesentlichen Wandlungsbefähiger sind in diesem System enthalten. Eine klare Modulstruktur zur effizienten Konfiguration ist jedoch nicht beschrieben. Ebenso ist kein Implementierungs- und Steuerungskonzept angegeben. Dies bedeutet, dass bei einem höheren Automatisierungsgrad im Zuge einer Rekonfiguration größere steuerungstechnische Anpassungen nötig sind.

Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen

Klein entwickelt eine Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen. Produktionsanlagen werden auf Basis des zu realisierenden Produktionsprozesses konzipiert. Der Prozess wird auf Grundlage von Funktionen modelliert, welche einzelnen Modulen zugeordnet werden. Die resultierenden Modulkombinationen werden durch die Vorgabe von Eigenschaften eingegrenzt [KLE15, S. XII]. Als notwendige Teilaspekte hierzu werden der Aufbau einer Wissensbasis sowie ein modulbasiertes Engineering genannt. Für den Aufbau der Wissensbasis wird ein Modularisierungsverfahren auf Basis der Design Structure Matrix vorgestellt. Die Modularisierung bestehender Anlagen erfolgt hierbei auf Basis einer Komponentenliste (bspw. Stückliste) und Informationen zu den Komponentenbeziehungen untereinander. Zur Systematisierung der Module in der Wissensbasis werden diesen Funktionen und Eigenschaften zugeordnet. [KLE15, S. 95]. Die Modulkombinationen können durch technische und wirtschaftliche Bewertungskriterien verglichen und durch eine Simulation abgesichert werden. Ziel der Methode ist ein Anlagenkonzept und kein finaler Entwurf [KLE15, S. 4]. Die finale technische Ausgestaltung, die Implementierung und das Betreiben der Anlage ist somit nicht Teil der Arbeit.

Engineering Methode für cyber-physische Produktionsanlagen

Der Ansatz von Zühlke et al. soll die Methode des Lean Automation mit Industrie 4.0 Lösungen anreichern. Hierzu sollen cyber-physische Systeme (CPS) als standardisierte Bausteine in Produktionsanlagen eingebunden werden. Diese CPS bestehen aus Steuerung, Mensch-Maschine-Interface sowie Aktuatoren und Sensoren. Es werden Anforderungen bestimmt und die Grobstruktur eines Frameworks entworfen, welches standardisierte Schnittstellen ermöglicht und CPS als Serviceanbieter flexibel in Anlagen einbinden kann. Ingenieuren soll ermöglicht werden, sich bei der Implementierung von CPS auf die Prozessauslegung und-implementierung zu konzentrieren. Hardwaretreiber, Kommunikationsprotokolle und Systemanpassungen sollen automatisch erstellt werden. [KOL15]

Um das Engineering von CPS als komplexe und multidisziplinäre Systeme zu unterstützen wird eine Methode als Leitfaden entwickelt. Hierzu wird ein prozedurales fünf Phasen Modell präsentiert. [MARS 16]

In der ersten Phase wird das Gesamtsystem abstrahiert und eine interdisziplinäre modellbasierte Beschreibung vorgenommen. Ebenso erfolgt eine funktionale Aufgabenbeschreibung und eine Unterteilung in Subsysteme. In Phase zwei werden CPS Module gebildet und die Schnittstellen zwischen den Modulen definiert. In Phase drei erfolgt eine Entwicklung auf Modulebene unterteilt nach Einzeldisziplinen. Die Module werden gemäß ihrer zu erfüllenden Teilfunktion entwickelt. In Phase 4 und 5 erfolgen eine Integration der Subsysteme (CPS) zu einem Cyber-Physischen-Produktions-System (CPPS) und eine Anpassung der Schnittstellen sowie Optimierungsschleifen. Der Steuerungsablauf erfolgt service-orientiert. [MAR16]

Der Ansatz beschreibt eine Integration von Industrie 4.0 Technologien zur Verbesserung bestehender Lean Automation Konzepte. Zur Entwicklung von CPPS wird eine Methodik entwickelt, welche sehr ähnlich der VDI 2206 vorgeht. Der Beschreibungsansatz ist interdisziplinär jedoch wird in den Ausführungen hauptsächlich die steuerungstechnische Umsetzung und Modellierung beschrieben. Die konkrete Analyse und Anforderungsdefinition sowie eine Vorgehensweise zur Bildung von Modulen und Methoden zur spezifischen technischen Lösungsfindung sind nicht enthalten.

Modulares Engineering im Maschinen- und Anlagenbau

Bei diesem Ansatz von Vogel-Heuser et al., welcher den Engineering Prozess von automatisierten Anlagen unterstützen soll, wird die Produktionsanlage zur Konstruktion und Auslegung in interdisziplinäre Module unterteilt. Diese werden in drei interdisziplinäre Ebenen als Basic Module, Application Module und Project/Facility Module unterteilt. Untergliedert sind die interdisziplinären Module in Tagged Units und diese wiederum in Single Units Module die hinsichtlich der Einzeldisziplinen (Software, Mechanik etc.) unterteilt werden. Bei der Single Unit soll jede Teildisziplin die Basisfunktionen sicherstellen. Tagged Unit ist die Kombination aus Single Units. Hier soll wiederum disziplinspezifisch die Funktion in der Kombination abgesichert werden. Die Basisfunktionen der Maschine werden über einen Konfigurator ausgewählt und die entsprechend benötigten Basismodule hinzugefügt. Für jedes konfigurierte Basic Module wird ein Datensatz in der Steuerung erzeugt. [SIM09]

Die Methode stellt einen Ansatz zur Übertragung entwickelter Module in ein Software- und Steuerungssystem dar. Eine Gesamtsteuerungsarchitektur wurde nicht gezeigt. Die Methodik startet ausgehend von dem Modularisierungskonzept, eine vorhergehende durchgängige Planung ist nicht beschrieben.

In einer weiteren Analyse stellen Vogel-Heuser et al. die Anforderungen dar, die im durchgängigen modularen Engineering im Maschinen- und Anlagenbau bestehen. Die meisten Herausforderungen ergeben sich durch die Interdisziplinarität. Es sind Maßnahmen nötig, um die Modellierung und den Entwurf zu unterstützen und Inkonsisten-

zen zu managen. Ebenso sind eine klare Moduldefinition und ein Modulvariantenmanagement nötig. Es wird betont, dass es ein solches durchgängiges Engineering Unterstützungssystem bisher nicht existiert. [FEL15]

Zur Visualisierung wurde in Abbildung 3.1 gezeigtes Problemmodell aufgestellt:

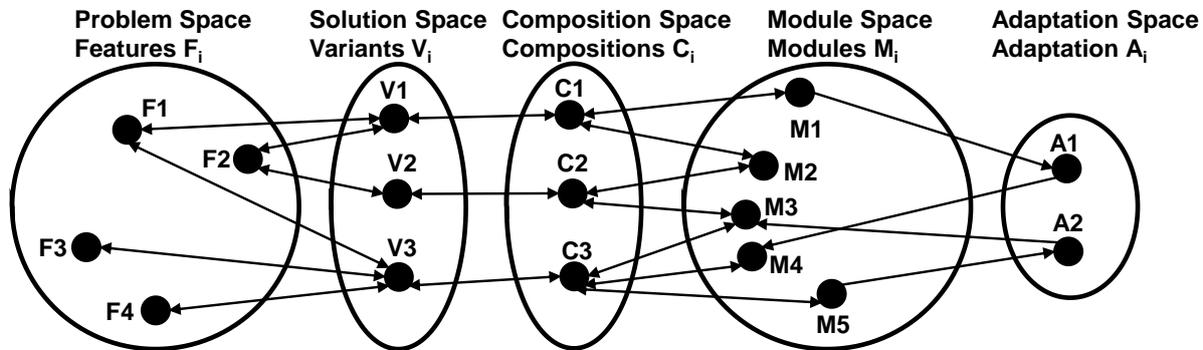


Abbildung 3.1: Problemmodell des Engineeringprozesses [FEL15]

Ausgangspunkt sind die Ausprägungen einer Anlage (F_i) welche durch den Kunden gewählt werden können. Die Kombination dieser ergibt die einzelnen zu produzierenden Varianten. Je höher die Variantenanzahl, je höher ist der Bedarf nach Wiederverwendung einzelner Module. Vorhandene Module werden im Modul-Space definiert, sie bestehen wiederum aus disziplinspezifischen Komponenten (Sensoren, Pneumatik, etc.). Im Composition Space ist die Modulkombination zur Bereitstellung einer Variante und damit der Erfüllung der zugehörigen Kundenforderungen (F_i) dargestellt. Im Adaptation Space sind mögliche Adaptionen beschrieben, welche an den Modulen vorgenommen werden können. Als Fazit wird angegeben, dass eine generelle Methode zur gesamtheitlichen Betrachtung des Problemmodells und der definierten Herausforderungen bisher nicht existiert. [FEL15]

Ansätze zur Steuerung modularer Produktionssysteme

Systemarchitektur für Industrie 4.0-Produktionsanlagen

Gorecky, Zühlke et. al. Haben bei ihrem Ansatz die Ziele mechatronische Wandlungsfähigkeit, individualisierte Massenproduktion und inner- und überbetriebliche Vernetzung in die Anlagensteuerung zu integrieren [GOR16b]. Hieraus werden Anforderungen an eine Produktionsanlage abgeleitet. Um Wandlungsfähigkeit zu erreichen sind modulare Prozessbausteine und eine modulare Versorgungsinfrastruktur (Medien-, Datenversorgung, Anbindung an Steuerungs- und Sicherheitsfunktionen) nötig. Zur individualisierten Massenproduktion wird eine ganzheitliche Produktverfolgung gebraucht und eine größtmögliche Produkt- und Variantenvielfalt soll abgedeckt werden. Zur Inner- und überbetrieblichen Vernetzung sind integrierte Schnittstellen und modulare IT-Systeme notwendig. [GOR16a; GOR16b] Um die Anforderungen zu erfüllen wird eine allgemeine Systeminfrastruktur vorgestellt, welche aus 5 Schichten besteht: Produkt-, Produktions-, Versorgungs-, Integrations- und IT-Systemschicht. Die Einzelkomponenten sollen nach Aufgaben, Funktionen, Eigenschaften und Zuständigkeiten

voneinander getrennt werden, um Abhängigkeiten im Gesamtsystem zu reduzieren. [GOR16a; GOR16b]

Das herzustellende Produkt wird mit einem digitalen Produktgedächtnis ausgestattet, welches zur Identifikation und Übermittlung relevanter Produktionsdaten dient. Die Produktionsmodule sollen nach dem Plug & Play Prinzip kombinierbar sein. Hierzu sind eine automatische Topologierkennung sowie einheitliche Schnittstellen vorgesehen. Die Versorgung mit Medien, Daten und die Steuerungsanbindung werden von der Versorgungsschicht übernommen. Die Integrationsschicht arbeitet mit den Produktionsmodulen nach einem serviceorientierten Prinzip zusammen und steuert so den Produktionsablauf. Die IT-Systemschicht übernimmt die Produktionsplanung und -steuerung. Sie besteht aus gekapselten modularen Softwaremodulen welche miteinander über einheitlichen Informationsmodelle kommunizieren. Der Informationsaustausch kann durch verschiedene Kommunikationsprotokolle erfolgen. Die Vorgehensweise konzentriert sich auf die steuerungstechnische Abbildung einer wandlungsfähigen Produktion. Methoden zum Systementwurf und der technischen Realisierung werden nicht berücksichtigt. [GOR16a; GOR16b]

Steuerung modularer Produktionssysteme

Abel stellt ein Konzept zur automatisierten Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen vor, welches zur Beschleunigung von Inbetriebnahmevorgängen genutzt werden soll. Die Rekonfiguration wird durch mechatronische Module erreicht, welche die benötigten Funktionalitäten bereitstellen. Die automatisierte Inbetriebnahme erfolgt mit einer maschineninternen serviceorientierten Architektur. Diese basiert auf Diensten, die von den Modulen angeboten werden. Die aktuelle Maschinenkonfiguration wird erfasst und ein „Geschäftsprozess“ für die Inbetriebnahme erzeugt [ABE16, S. 132]. Dieser Prozess gliedert sich in fünf Phasen. Zu Beginn wird innerhalb der ersten beiden Schritte eine Identifikation und Analyse vorgenommen. Hierbei wird eine Basiskommunikation initialisiert, die vorhandenen Module identifiziert und ihre Funktionsbeschreibungen abrufen. Anschließend wird die vorhandene mit der benötigten Funktionalität abgeglichen und ermittelt, welche Maßnahmen in welcher Reihenfolge zur Inbetriebnahme durchgeführt werden müssen. Danach wird das Inbetriebnahmevorgehen generiert und in der letzten Phase durchgeführt. Hierbei werden unter anderem die notwendigen Parameter in die Module geschrieben und falls nötig manuelle Anpassungen vorgenommen. [ABE16, S. 79] Die Module werden untergliedert in Module mit Mechanik und Elektronik, reine Software- / Firmwaresysteme oder elektronische Systeme. Alle Module besitzen die gleiche informationstechnische Schnittstelle. [ABE16, S. 97]

Das Konzept stellt ein Vorgehen zur effizienten Nutzung der Konfiguration dar, indem eine automatisierte Inbetriebnahme erfolgt. Ein Planungsansatz zur Prozessplanung und Ablaufsteuerung ist nicht enthalten.

Ein ähnlicher Ansatz wird von Friedrich, Verl et al. als flexible modulare Steuerung eines Produktionssystems vorgestellt, welches aus herstellerunabhängigen Funktionen und Modulen besteht. Es wird eine standardisierte Schnittstelle und Beschreibung für die Funktionen und Module entwickelt. Die Steuerung kann automatisiert die verfügbaren Module und Funktionen identifizieren und eine (Re-)Konfiguration vornehmen. Die Ablaufsteuerung erfolgt servicebasiert. [FRI15]

Der Ansatz beschreibt eine flexible Steuerungsarchitektur mit der Möglichkeit der Selbstidentifikation und einer variablen Aufgabendurchführung. Ein Ansatz zur technischen Lösungsfindung der Module und die Prozessgestaltung sind nicht enthalten.

Cloudbasierte Steuerungskonzepte

Im Projekt RetroNet wurde eine Konnektor Technologie geschaffen, welche es ermöglicht, mit Bestandmaschinen eine Kommunikationsfähigkeit und Vernetzung zu schaffen, um cyber-physische Fähigkeiten zu nutzen, Prozessdaten zu erfassen und zu verarbeiten. Die erfassten Daten werden in einer Cloud gespeichert. Die Daten können von mehreren Diensten abgerufen und analysiert werden. Mit dieser Vorgehensweise soll es ermöglicht werden, einen bestehenden Maschinenpark zum Einsatz aktuellster I4.0 Technologien befähigen. [BMB17; RET]

Schwerpunkt des Projektes piCASSO ist die Verlagerung möglichst vieler Steuerungsfunktionalitäten aus der Maschinensteuerung heraus in die Cloud. Hierzu wird untersucht welche Komponenten (bspw. sicherheitsrelevante oder echtzeitkritische) in der Steuerung verbleiben müssen und welche ausgelagert werden können. Zur Ausführung von spezifischen Diensten innerhalb des Produktionsprozesses werden Apps aus der Cloud geladen, welche die Dienste anbieten. Diese Apps sind in einem zentralen Verzeichnis registriert. Die Logik zur Verkettung der einzelnen Systeme wird ebenfalls in die Cloud verlagert. Ein durchgängiges Konzept zur Komposition der verschiedenen Dienste war jedoch nicht im Fokus des Projektes. [CHE16; PIC16]

Innerhalb der beiden Forschungsprojekte wurde die Verlagerung von Steuerungsfunktionen in eine Cloud und die Ausführung dieser Funktionen über Apps und eine ebenfalls cloudbasierte Ausführungslogik. Eine durchgängige Planung und Einbindung von Montageplanungsdaten wurde ebenso wie eine gezielte Rekonfiguration durch ein Modularisierungskonzept im Sinne modularer Betriebsmittel nicht betrachtet.

Zusammenfassung und Bewertung

Zur Zusammenfassung und Bewertung der Ansätze wurde die in Abbildung 3.2 gezeigte Bewertungsmatrix erstellt. Die beschriebenen Forschungsansätze werden darin hinsichtlich ihrer Erfüllung der für diese Arbeit wichtigen Teilaspekte der Systemanalyse und -entwurf und der Steuerung bewertet. Zusätzlich wird bewertet ob die relevanten Themen der Arbeit berücksichtigt werden und ob sich die Ansätze im relevanten Einsatzbereich bewegen.

zur Anpassung an unterschiedliche Varianten methodisch nicht explizit berücksichtigt und beschrieben.

Aus dieser Betrachtung ergibt sich der theoretische Handlungsbedarf, eine durchgängige Methodik zu entwickeln. Diese soll ausgehend von den durchzuführenden Montageaufgaben und den daraus resultierenden Anforderungen eine lösungsneutrale Beschreibung des notwendigen Montageprozesses ermöglichen und eine Vorgehensweise zur technischen Lösungsfindung und Betriebsmittelauswahl geben. Darauf aufbauend ein Integrations- und Steuerungskonzept, welches in der Lage ist, Rekonfigurierbarkeit zu gewährleisten und die durchzuführenden Prozesse flexibel anzupassen.

3.1.2 Praktische Umsetzung modularisierter Anlagenkonzepte

Zahlreiche Firmen bieten modulare Montagesysteme an, als Beispiele sind Bosch, Teamentchnik oder Hahn Automation zu nennen (Vgl. [BOS16; HAH; TEA]).

Im Bereich der Automobilmontage beschäftigen sich sowohl Hersteller als auch Lieferanten von Produktionsanlagen mit der Gestaltung modularer Montagesysteme. Als Beispiel kann Audi genannt werden, hier wird die modulare Montage als Konzept der Produktion ohne Fließband mit flexiblen modularen Montagestationen beschrieben. Ein Prozessrechner steuert fahrerlose Transportsysteme, welche die Fahrzeuge transportieren, flexibel in verfügbare Stationen. Ziel ist das Erreichen einer räumlichen und zeitlichen Flexibilität und die Möglichkeit einer einfachen (Re-)Konfigurierbarkeit durch Änderung oder Hinzufügen von Stationen [AUD16b].

Als Anlagenlieferant bietet Dürr mit dem Fastplant System ein modulares Endmontagekonzept an. Standardmodule, basierend auf einem Stahlbautakt, sollen eine schnellere Planung sowie eine flexible (Re-)Konfiguration und Skalierbarkeit der Montagelinie ermöglichen. Die Module sind erweiterbar, und können im Automatisierungsgrad angepasst werden. [DÜR17b]

Fazit

Die relevanten Forschungsansätze wurden vorgestellt und verglichen, sowie der bestehende Handlungsbedarf abgeleitet. Zusätzlich wurden bestehende Konzepte zur praktischen Umsetzung modularer Anlagen aufgezeigt.

3.2 Mensch-Roboter-Kooperation in der Automobilproduktion

Innerhalb dieses Kapitels werden die Nutzungsmöglichkeiten und Potenziale der MRK als Möglichkeit zur Umsetzung der angepassten Automation in der Automobilindustrie beschrieben. Hierzu wird zunächst eine Übersicht der Automobilmontage und die Nutzung der Robotik in den einzelnen Gewerken gegeben. Folgend wird dann im speziellen auf die Ziele und Arten der MRK innerhalb der Automobilproduktion eingegangen. Hierzu werden bestehende und in der Entwicklung befindliche Ansätze zum MRK Einsatz in der Fließmontage dargestellt. Diese werden im Anschluss bewertet und bestehender Entwicklungsbedarf wird abgeleitet.

3.2.1 Übersicht Automobilmontage und Nutzung der Robotik

Die Fahrzeugproduktion im Automobilwerk lässt sich, wie in Abbildung 3.3 gezeigt, im Wesentlichen in die Bereiche Presswerk, Karosseriebau, Lackiererei und Montage (mit Vor- und Endmontage) gliedern.

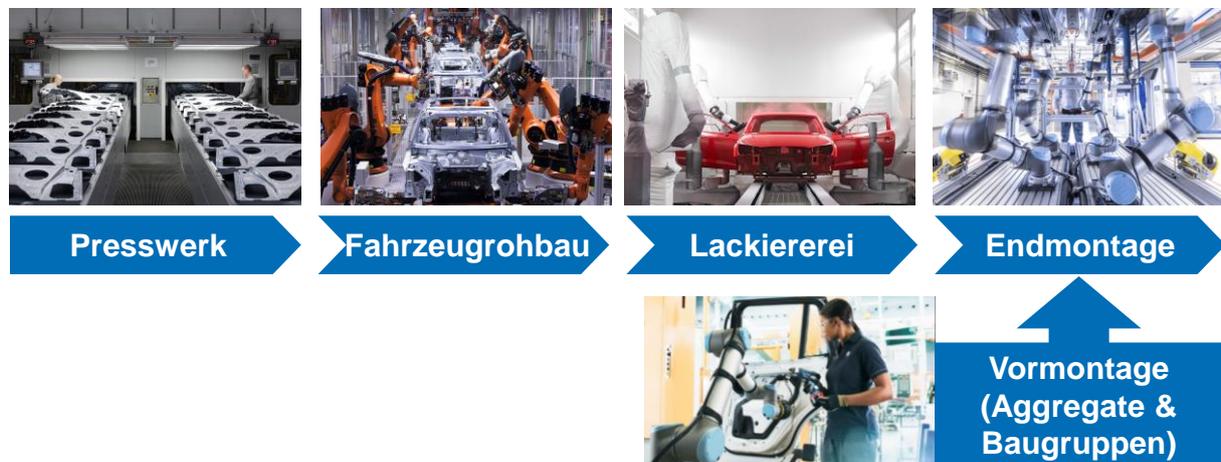


Abbildung 3.3: Gliederung der Automobilproduktion [AUD16a; BMW17]

In Abbildung 3.4 ist die Verteilung der Gesamtzahl der Roboter auf die einzelnen Produktionsbereiche gezeigt. Bei hoher Anzahl gleicher Varianten, welche beispielweise im Bereich des Karosserierohbaus auftreten, ist eine Automation durch herkömmliche Industrieroboter sehr effizient, wodurch sich der hohe Anteil von 80% erklären lässt. Bei einer hohen Variantenzahl, welche spezifische Prozesse erfordern, ist eine manuelle Durchführung der Prozesse die kostengünstigste Möglichkeit. Diese Aufgaben finden sich häufig in der Endmontagelinie, was den geringen Anteil an Robotik in diesem Bereich erklärt. Der ideale Anwendungsbereich für Mensch-Roboter-Kooperation liegt in den Bereichen, in denen einzelne Prozesse möglichst Varianten übergreifend in gleicher Art und Weise durchgeführt werden müssen. Daneben können Mitarbeiter komplexere und spezifischere Aufgaben übernehmen.

Die Mensch-Roboter-Kooperation (MRK) sowie die Möglichkeit für angepasste Automation werden als Schlüsseltechnologien angesehen, um dieses Ziel zu erreichen. Eine durch das Fraunhofer IAO durchgeführte Studie an bisher im Serieneinsatz umgesetzten Lösungen [BEN16] zeigt in Abbildung 3.4, dass die Automobilindustrie mit ca. 40% Anteil an den bisher in der Industrie umgesetzten MRK Anwendungen eine Vorreiterrolle einnimmt.

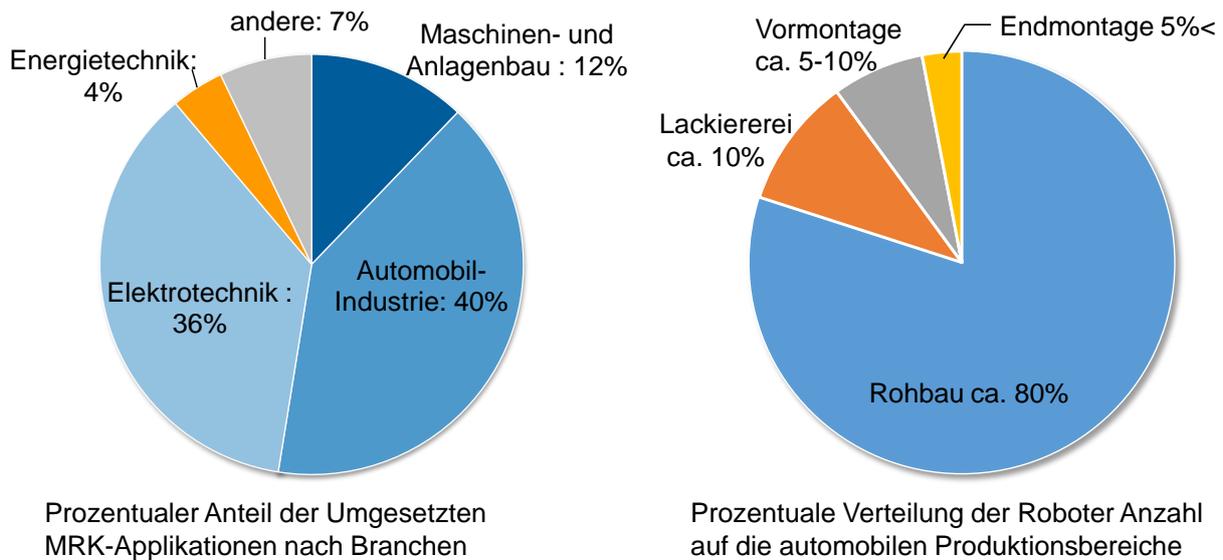


Abbildung 3.4: Umgesetzte MRK-Applikationen und Robotereinsatz [BEN16]

3.2.2 Ziele und Arten der MRK in der Automobilindustrie

Die Hauptziele, welche die Automobilhersteller mit dem Einsatz der MRK erreichen wollen sind:

- Verbesserung der Ergonomie und Arbeitsinhalte für Mitarbeiter (Erleichterung um repetitive Aufgaben, weniger Monotonie)
- Produktivität, Qualität und Präzision steigern
- Flexibilität und Wandlungsfähigkeit erhöhen

Einsatz der MRK in der Automobilproduktion

Bei einer Recherche wurden Applikationen der Automobilindustrie ermittelt, welche sich in der Entwicklung befinden oder bereits im Produktivbetrieb eingesetzt werden und seitens der Hersteller oder Anlagenintegratoren veröffentlicht wurden. Der heutige Einsatz der MRK in der Automobilindustrie lässt sich wie in Abbildung 3.5 gezeigt untergliedern:

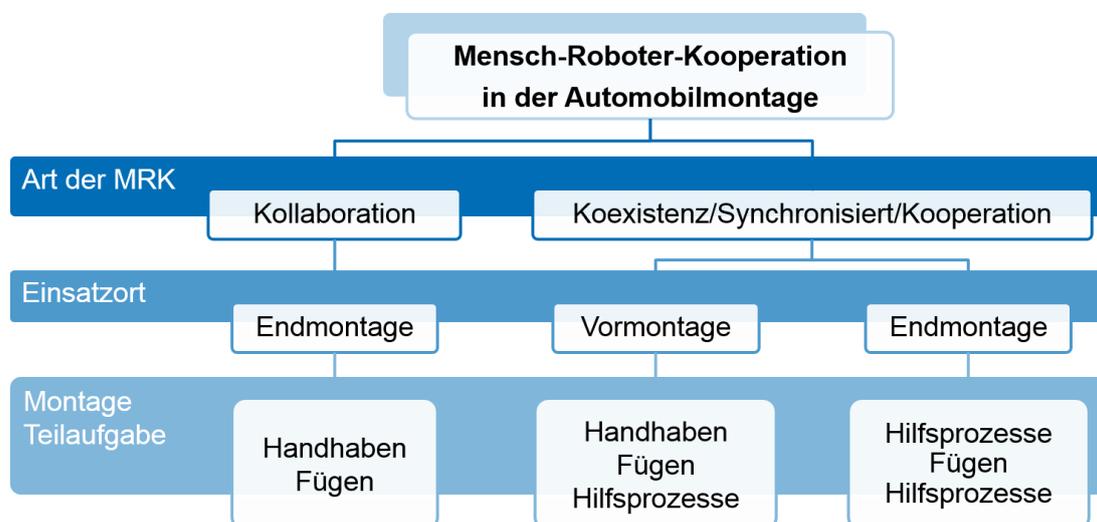


Abbildung 3.5: Gliederung der MRK-Einsatzbereiche in der Automobilproduktion

Eine grundsätzliche Entscheidung wird im ersten Schritt nach der Art der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter getroffen

Mensch-Roboter Synchronisiert, Kooperation, Koexistenz,

Der derzeit häufigste Anwendungsfall in der Automobilmontage ist der Bereich ohne direkte Kollaboration. Dies kennzeichnet sich durch gemeinsame oder überlappende Arbeitsräume von Mensch und Roboter, jedoch mit einer zeitlichen Trennung bei der Durchführung der Tätigkeiten, bzw. bei der Kooperation durch unterschiedliche Tätigkeiten im gleichen Arbeitsraum. Es existieren ebenfalls Anwendungen, bei denen der Roboter autonom und unabhängig vom Menschen seine Tätigkeit durchführt, mit dem Unterschied zu einer konventionellen Roboteranwendung ohne Schutzzaun und mit überwachtem Arbeitsraum, hier als Koexistenz bezeichnet.

Mensch-Roboter Kollaboration

Bei dieser Form der Zusammenarbeit arbeiten Mensch und Roboter im gleichen Arbeitsraum an der gleichen Aufgabe. Hierzu gibt es aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen bisher nur sehr wenige Anwendungsfälle in der Automobilindustrie.

Einsatzort

Eine weitere Unterscheidung erfolgt nach dem Einsatzort. Im Bereich der Lackiererei und des Karosseriebaus liegt der Automatisierungsgrad mit konventionellen Anlagen und Robotern bereits bei über 90%. Es gibt daher nur limitierte Einsatzbereiche für die Mensch-Roboter-Kooperation wie beispielsweise Spalt- und Ebenheitsprüfungen. Ein Großteil der Anwendungen findet in Vormontagebereichen und der Endmontagelinie statt.

In Vormontagelinien bieten sich zahlreiche Prozesse zur Teilung zwischen Mensch und Roboter an. Aufgrund der geringeren Bauteilgröße und guten Zugänglichkeit ist die Integration häufig weniger komplex als in der Endmontagelinie.

Der Automatisierungsgrad in der Endmontagelinie ist üblicherweise sehr gering. Dies ist bedingt durch die hohe Variantenvielfalt und dadurch entstehende Komplexität sowie den fließenden Betrieb, welcher eine kosteneffiziente Vollautomation erschwert.

Sowohl in der Vor- als auch in der Hauptmontagelinie wird die MRK hauptsächlich für Teilaufgaben der Montage im Bereich Handhaben (Zuführen), Fügen (Schrauben, Nieten, Kleben, etc.) und für Hilfsprozesse (Qualitätsprüfungen) genutzt.

Arbeitsraumplanung und Sicherheitsabnahme einer MRK-Montagestation

Sollen Tätigkeiten gleichzeitig am gleichen Ort und Bauteil von Mensch und Maschine durchgeführt werden, muss der Arbeitsraum entsprechend aufgeteilt werden. Die Zugänglichkeit und Sicherheit muss gewährleistet sein. Diese Form der Zusammenarbeit als direkte Kollaboration ist sicherheitstechnisch sehr komplex und wie zuvor beschrieben sehr selten im Serieneinsatz umgesetzt. Häufiger ist der Fall der kooperierenden, synchronisierten oder koexistierenden Zusammenarbeit. Hier müssen die Arbeits-

räume so geplant werden, dass sie entweder nicht überlappen oder eine zeitliche Trennung stattfindet. Die Vorgehensweise zur Sicherheitsabnahme ist ein komplexer iterativer Prozess. Im Folgenden werden die erforderlichen Einzelschritte aufgezählt, aber nicht detailliert.

Die nötigen Schritte der Sicherheitsabnahme lassen sich unterteilen in Aufgaben des Planers und Integrators des Prozesses sowie des späteren Betreibers:

Aufgaben Prozessplaner und Integrator:

- Risikobeurteilung erstellen. Evtl. Überprüfung der Beurteilung durch die Arbeitssicherheit oder Berufsgenossenschaft.
- Konformität zu Maschinenrichtlinie und den relevanten Normen für Industrie und MRK-Roboter erklären.
- CE-Kennzeichnung der Anlage.
- Erstellen einer Dokumentation und Schulung der Betreiber

Aufgaben Betreiber:

- Basierend auf Risikoanalyse zusätzliche Gefährdungen aus dem Umfeld beurteilen
- Regelmäßig prüfen, ob sich Umgebungsbedingungen ändern und der Anlagenzustand sicherheitskonform ist.

3.2.3 Bestehende Applikationen und Forschungsansätze in der automobilen Fließmontage

Zahlreiche OEM haben bereits Produktionsanlagen unter Nutzung der Mensch-Roboter-Kooperation in Prototypenanlagen aufgebaut und im Produktivbetrieb eingesetzt. Im Folgenden werden einzelne Beispiele aus dem Bereich der Fließmontage illustriert (Siehe Abbildung 3.6), welche von den OEM, Anlagenbauern oder Forschungseinrichtungen implementiert und veröffentlicht wurden.

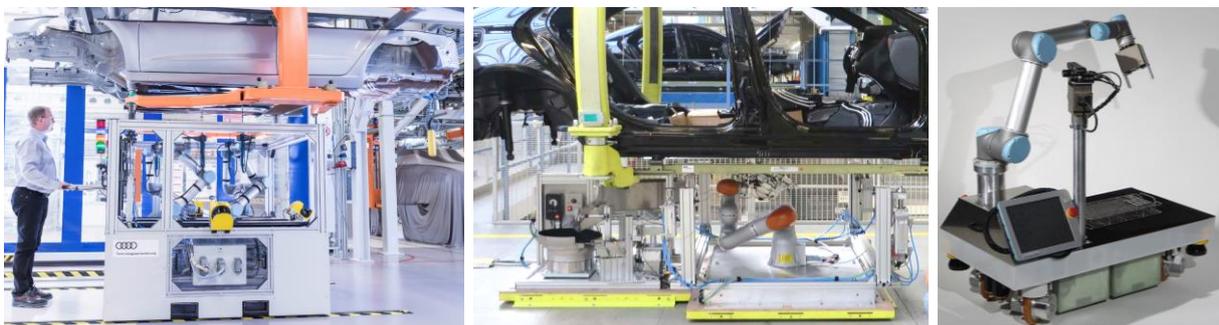


Abbildung 3.6: Bestehende MRK-Applikationen in der Fließmontage [AUD16a; DAI16; FRA16b]

Audi Unterbodenverschraubung „LBR Inline“ in der Audi Smart Factory

Bei diesem Prozess, welcher aktuell in der Audi Smart Factory entwickelt wird, wird ein Roboter genutzt, um die Unterbodenverkleidung des Fahrzeuges zu verschrauben. Aktuell setzt Audi dafür einen konventionellen Montagewagen mit einem starren Rahmen und 14 Schrauben ein. Der LBRinline ist eine Weiterentwicklung unter Nutzung

von vier Leichtbaurobotern auf einer mobilen Plattform. Die Verkleidung wird von Mitarbeitern vorgefügt und ausgerichtet, die Fügemitel sind bereits an der Verkleidung angebracht. Anschließend wird der Wagen manuell über Zapfen an das Fahrzeuggehänge angekoppelt, dieser fährt dann ca. 20 Sekunden lang unter dem Auto mit. Die Leichtbauroboter verschrauben autark die Unterbodenverkleidung Modell- und Variantenunabhängig. Ein Sicherheitssystem mit drei Laserscannern gewährleistet, dass die Roboter nicht in direkten Kontakt mit dem Mitarbeiter kommen. [AUD16a]

„Vamos“-Plattform zum Stopfensetzen am Unterboden in der Daimler TecFabrik

Zum Stopfensetzen am Fahrzeugunterboden wird ein sensitiver Roboter auf einer mobilen Plattform genutzt. Diese Plattform befindet sich unterhalb des Fahrzeuges und wird an das Fahrzeuggehänge angekoppelt und mitgeschleppt. Der Roboter verfügt über ein Stopfensetzwerkzeug, setzt nacheinander die Verschlussstopfen und prüft sie direkt im Anschluss über die integrierte Kraft- und Momentensensorik auf korrekten Sitz. Auf der Plattform ist eine Vereinzelungs- und Zuführtechnik für die Verschlussstopfen angebracht, welche das Magazin des Werkzeuges bei der Rückfahrt des Systems nachlädt. Da der Roboter unterhalb Hüfthöhe arbeiten kann, befindet sich das Fahrzeug tiefer als beim herkömmlichen Unterbodenmontageprozess, hierdurch können Werker kooperierend im gleichen Arbeitsraum weitere Montagetätigkeiten seitlich am Fahrzeug durchführen. [DAI16]

Fraunhofer IPA Rob@Work Plattform

Die Rob@Work Plattform ist ein mobiler Manipulator, welcher mit verschiedenen Manipulatoren, Sensoren und Werkzeugen ausgerüstet werden kann. Zur Prüfung der Tauglichkeit für die Fahrzeugmontage wurde zusammen mit der BMW AG Untersuchungen in der Endmontage in bandnahen Bereich durchgeführt. Durch das omnidirektionale Fahrwerk kann in engen und dynamischen Umgebungen navigiert werden. Die Plattform kann eingesetzt werden, um Montage- und Logistikaufgaben durchzuführen [FRA16b].

System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage

In zwei Dissertationen der TU München (vgl. [SHE15; WER09]) werden Methoden zur Durchführung von Montageprozessen in der Fließmontage erläutert. Werner berücksichtigt bei seinem Ansatz keine Montage in Mensch-Roboter-Kooperation, er setzt einen konventionellen Industrieroboter ein. Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Entwicklung eines Messsystems und Synchronisationsprinzips zur Umsetzung der automatisierten Radmontage im Fließbetrieb [WER09, S. 160–161].

Shen nutzt MRK verwendet aber ebenfalls einen konventionellen Industrieroboter, welcher ortsfest verbaut ist. Bedingt durch die Konstellation liegt der Schwerpunkt der Arbeit bei Shen auf der Betrachtung der Sicherheit und Überwachung der Arbeitsbereiche in der Zusammenarbeit des Menschen mit einem herkömmlichen Industrieroboter [SHE15, S. 163–165].

Zusammenfassung und Fazit

In Abbildung 3.7 dargestellt ist ein Vergleich der bisher existierenden Systeme zu sehen. Es zeigen sich bei allen Systemen Lücken. Insbesondere ein modulares Konzept hinsichtlich des konstruktiven Aufbaus, d.h. der technischen Realisierung mit gleichzeitiger Repräsentierung der Modularität in der steuerungstechnischen Umsetzung ist bisher nicht vorhanden. Die variable Änderung der Aufgabe wird ebenfalls nicht explizit beschrieben. Hinsichtlich Reifegrad und Robustheit für den industriellen Einsatz gibt es teilweise noch Entwicklungsbedarf.

		MRK in der automobilen Fließmontage			
		Audi Unterboden- verschraubung LBR Inline	„Vamos“-Plattform Daimler	IPA Rob@Work Plattform	System für Mensch-Roboter- Koexistenz in Fließmontage
Bewertungs- kriterien	Quelle	[AUDI 16a]	[DAIM 16]	[FRAU 16]	[SHEN 16]
Universalität		○	●	●	●
Mobilität		○	●	●	●
Skalierbarkeit		○	●	●	●
Konstruktive Modularität		○	●	●	●
Steuerungstechnische Modularität		○	●	●	○
Rekonfigurierbarkeit		○	●	●	●
variable Aufgabenanpassung		○	●	●	●
Reifegrad		○	●	●	●
Robustheit		●	●	●	●
Betrachtung		●	●	●	○
		vollständig	überwiegend	teilweise	eingeschränkt
		○			nicht berücksichtigt

Abbildung 3.7: Bewerteter Vergleich der existierenden Ansätze

Die gezeigten Anwendungsbeispiele zeigen das große Interesse der Automobilhersteller an der MRK und deren Nutzung. Die Herausforderung beim Einsatz besteht darin, die Technologie zielgerichtet zu implementieren, um die Produktivität und Qualität zu steigern aber gleichzeitig auch Flexibilität und Wandlungsfähigkeit zu ermöglichen. Hemmnisse stellen momentan noch die aufwendige Implementierung durch die fehlende Wiederverwendbarkeit und die hohen Sicherheitsstandards dar.

3.3 Fazit und Entwicklungsbedarf

Um der übergeordneten Forschungsfrage der Nutzung angepasster Automatisierungsprozesse in der Automobilmontagelinie zu entsprechen, ist eine durchgängige Methodik ausgehend von der Anforderungsanalyse über die Systemplanung bis zur technischen Realisierung nötig. Wie in Kapitel 3.1 gezeigt wurde, existiert bisher kein Ansatz, welcher diese Durchgängigkeit vollständig berücksichtigt. Die Schnittstelle zwischen Planung und technischen Realisierung sowie Implementierung ist bisher nur unzureichend untersucht worden.

Der Fokus des Betrachtungsbereichs in Bezug auf Wandlungsfähigkeit liegt zumeist auf (Re-)Konfigurierbarkeit und Skalierbarkeit in Bezug auf eine Veränderung des Anlagenaufbaus (Austausch von Modulen, Erweiterung etc.). Insbesondere unter dem Gesichtspunkt der angepassten Automation ist es jedoch wesentlich eine variable Aufgabenausführung in Bezug auf (un)vorhergesehene Varianten/Produktanpassungen und neue Modelle zu gewährleisten und direkt in der Produktion zu ermöglichen. Diese Entsprechung der Wandlungstreiber Universalität und Kompatibilität soll berücksichtigt werden.

Bestehende Vorgehensmodelle zur Systemplanung und -entwurf dargestellt in Kapitel 2.2 beziehen den objektorientierten Beschreibungsansatz nicht wesentlich mit ein. Diese Beschreibung ermöglicht jedoch eine Durchgängigkeit im Entwicklungsprozess, eine lösungsneutrale Beschreibung der Aufgabe und somit eine Zuordnung zu einem manuellen oder automatisierten Prozess als wesentliche Komponenten einer angepassten Automation. Zusätzlich wird die steuerungstechnische Implementierung der Module erleichtert.

Ein weiterer Schwachpunkt bestehender Ansätze ist eine fehlende Vorgehensweise zur Definition einer technischen Lösung bzw. geeigneter Betriebsmittel ausgehend von einer lösungsneutralen Beschreibung einzelner Module. Steuerungstechnische Ansätze haben hier oft eine einseitige Sichtweise in Bezug auf die Steuerungsarchitektur und die programmiertechnischen Aspekte. Eine Kombination aus modulbasierter Beschreibung einer technischen Lösung mit gleichzeitiger Integration derselben in ein Steuerungskonzept ist nur unzureichend beschrieben.

Zusammengefasst ergibt sich der Handlungsbedarf hinsichtlich folgender Gesichtspunkte:

- Durchgängigkeit ausgehend von geplantem Prozess zur technischen Realisierung und Ausführung
- (Re-)Konfiguration der Anlage auch hinsichtlich der durchzuführenden Aufgaben ermöglichen
- Objektorientierter Beschreibungsansatz und bestehende Vorgehensmodelle kombinieren
- Modulares Konzept mit Entsprechung in der konstruktiven und steuerungstechnischen Umsetzung
- Vorgehensweise zur technischen Lösungsfindung definieren
- Integrationskonzept sowohl für physische Automatisierungskomponenten als auch steuerungstechnische Entsprechung

Der Handlungsbedarf wird im folgenden Kapitel aufgegriffen, um zunächst Anforderungen abzuleiten und darauf aufbauend eine Methodik zu entwickeln.

4 Konzeption der Methodik

4.1 Ableitung der Anforderungen

Basierend auf der gestellten übergeordneten Forschungsfrage in Addition mit dem gewählten Betrachtungsbereich, den identifizierten Forschungslücken und des Handlungsbedarfs können wie in Abbildung 4.1 dargestellt, acht Anforderungen an die Methodik abgeleitet werden.

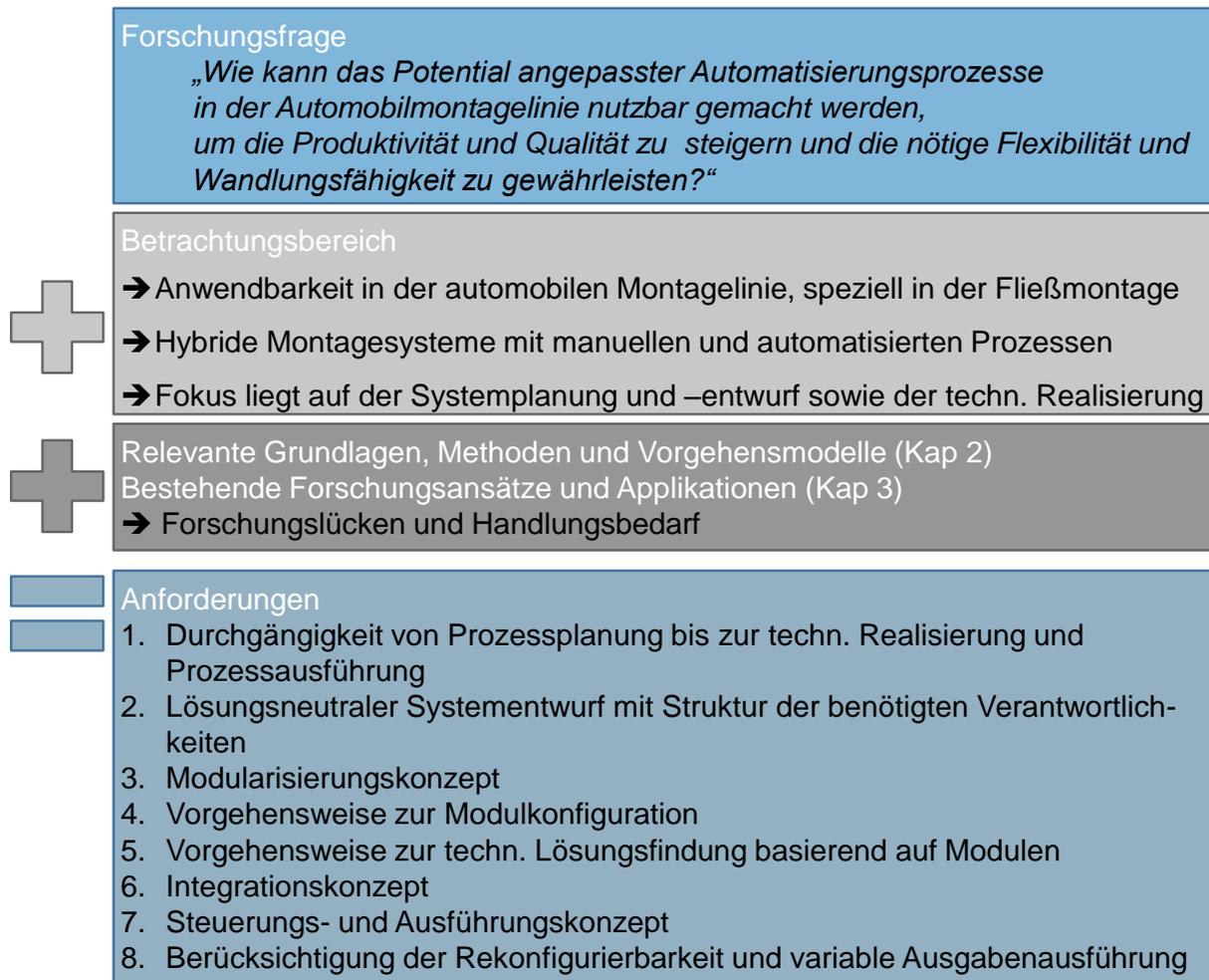


Abbildung 4.1: Ableitung der Anforderungen

Der Betrachtungsbereich der Methodik liegt in der Anwendung der Vorgehensweise in der Automobilproduktion. Im Bereich der Montagelinie wird das zu montierende Fahrzeug überwiegend stetig in einer Fließmontage bewegt. Daher soll die Methodik im speziellen geeignet sein, die Prozessanforderungen, welche sich durch ein bewegtes Montageobjekt ergeben, zu erfüllen. Wie Eingangs beschrieben herrscht in diesem Produktionsbereich eine hohe Variantenvielfalt und Komplexität; automatisierte Anlagen können die daraus resultierenden Anforderungen nur unzureichend erfüllen. Aus diesem Grund werden hybride Montagesysteme betrachtet, innerhalb derer die Aufgaben aufgrund ihrer spezifischen Fähigkeiten zwischen Mensch und Maschine intelligent aufgeteilt werden. Der Fokus innerhalb dieser Arbeit liegt dabei darauf, auf Grund-

lage einer Aufgabenbeschreibung für eine Montagestation einen geeigneten Prozessablauf zu bestimmen und einen Systementwurf durchzuführen. Zentraler Punkt ist die Übertragung des Entwurfs in eine technische Realisierung und das Erreichen eines wandlungsfähigen Prozessablaufs.

In Kapitel 3.3 wurde ein Resümee aus der Recherche bestehender Ansätze gezogen und der Handlungsbedarf abgeleitet. Es wurde dargestellt, dass existierende Vorarbeiten die Forschungsfragen nicht hinreichend beantworten. Daher wird im Rahmen dieser Arbeit eine Methodik entwickelt, welche die dargestellten Anforderungen erfüllen soll.

1. Durchgängigkeit von Prozessplanung bis zur techn. Realisierung und Ausführung

Ein durchgängiges Beschreibungsmodell wird benötigt, um auf Grundlage der definierten Anforderungen eine technische Lösung zu entwickeln. Ein flexibles Konzept zur Anpassung der Lösung bei sich ändernden Bedingungen ist erforderlich. Ohne Durchgängigkeit und die Verwendung einer einheitlichen Beschreibung können die notwendigen Wandlungsbefähiger nicht ermöglicht werden.

2. Lösungsneutraler Systementwurf mit Struktur der benötigten Verantwortlichkeiten

Ein lösungsneutraler Systementwurf ist erforderlich, um unabhängig von technischen Lösungen und Ausprägungen die erforderlichen Verantwortlichkeiten zu beschreiben, die zur Erfüllung der Anforderungen benötigt werden.

3. Modularisierungskonzept

Zur Zuordnung der Verantwortlichkeiten des lösungsneutralen Systementwurfs ist ein Modularisierungskonzept notwendig. Hierzu muss eine modulare Grundstruktur definiert werden, welche den späteren Systemaufbau beschreibt.

4. Vorgehensweise zur Modulkonfiguration

Ein Konfigurationskonzept zur Zuordnung der Unterverantwortlichkeiten zu den einzelnen Modulen muss definiert werden.

5. Vorgehensweise zur techn. Lösungsfindung basierend auf Modulen

Eine Vorgehensweise zur technischen Lösungsfindung muss entwickelt werden, um basierend aus den konfigurierten Modulen mit ihrer Unterverantwortlichkeit eine technischen Lösung ableiten zu können.

6. Integrationskonzept

Ein Integrationskonzept zur Zusammenführung der Einzelmodule und der Gewährleistung der Erfüllung der Gesamtverantwortlichkeit muss erstellt werden. Dies betrifft sowohl die steuerungstechnische als auch die physische Integration der Systemkomponenten.

7. Steuerungs- und Ausführungskonzept

Ein Steuerungskonzept zur Einbindung der Module und der Steuerung der Prozessausführung muss entwickelt werden.

8. Berücksichtigung der (Re-)Konfigurierbarkeit und variablen Ausgabenausführung

Innerhalb der gesamten Entwicklung der Methode muss sichergestellt werden, dass die entwickelten Lösungen eine (Re-)Konfigurierbarkeit und variable Aufgabenausführung des Montagesystems ermöglichen.

Basierend auf diesen Anforderungen werden im nächsten Kapitel die Vorgehensweise und der Aufbau der Methodik beschrieben.

4.2 Einordnung und Vorgehensweise

Einordnung

Zur Einordnung der Arbeit und zum besseren Verständnis des Betrachtungsbereichs sind in Abbildung 4.2 die Ebenen eines Unternehmens im Sinne der Fabrikplanung dargestellt. Diese Ebenen werden genutzt, um das Vorgehen innerhalb der Fabrikplanung zu strukturieren. Die Darstellung wurde von Hernández [HER03, S. 42–43] erstellt, ähnliche Unterteilungen nach Strukturebenen finden sich bei Schenk et al. und Eversheim et al. [EVE14, S. 9-66; 9-67; SCH14, S. 165–168].

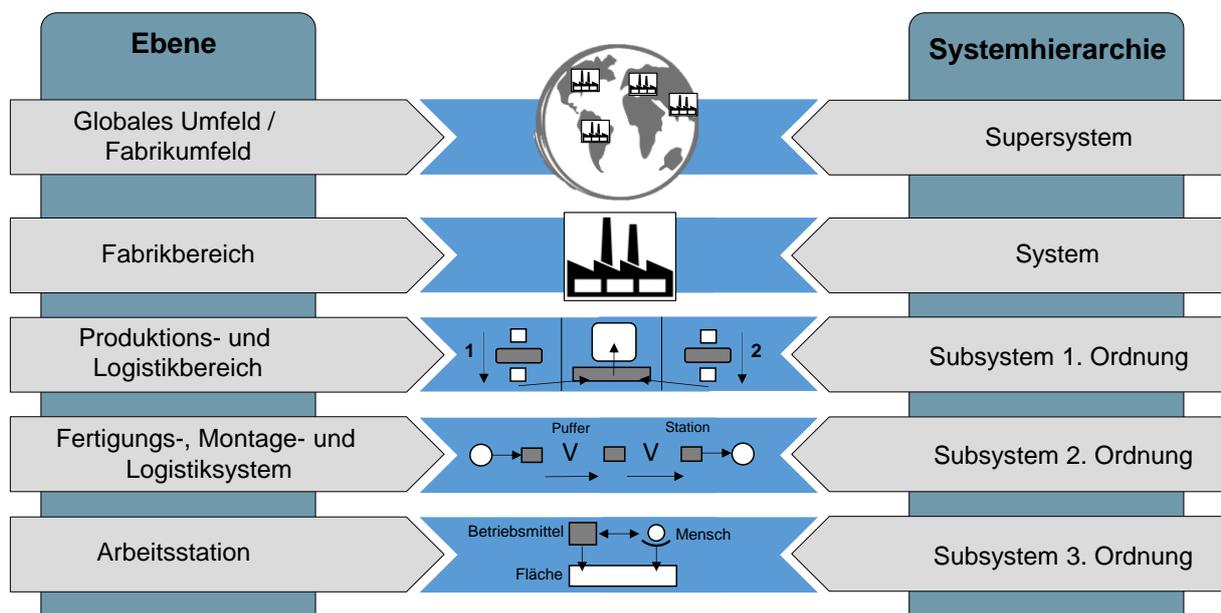


Abbildung 4.2: Ebenen und Systemhierarchie eines Unternehmens [HER03, S. 42–43]

Die Einordnung von Planungsmaßnahmen in diese Ebenen ist von entscheidender Bedeutung, da nur so der Betrachtungsbereich und die Detailtiefe der Planungsschritte nachvollzogen werden kann. Der Betrachtungsbereich dieser Arbeit befindet sich auf der Ebene der Arbeitsstation im Subsystem 3. Ordnung. Als Eingangsdaten werden die Ergebnisse einer Grobplanung und des Montage- und Logistiksystems der 2. Ordnung angenommen. Innerhalb der Stationsplanung werden die zur Erfüllung der Un-

terverantwortlichkeiten nötigen Module bestimmt, welche technisch durch die einzelnen Betriebsmittel als Sensoren und Aktoren repräsentiert werden. Der Detaillierungsgrad ist also entsprechend hoch und es werden einzelne Komponenten betrachtet, d.h. beispielsweise eine Schraubeinheit wird nicht als Ganzes beschrieben, sondern Schraubspindel und separat Kamerasystem mit Laserabstahdsensor zur Positionsbestimmung.

Das Zusammenwirken wird über eine ablaufbasierte Arbeitsanweisung gesteuert. Zusätzlich wird betrachtet, wie der Arbeitsraum aufgeteilt wird und welche Aufstellung und Anordnung in der Station gewählt wird. Die detaillierte Vorgehensweise wird in Kapitel 5.1 beschrieben.

Vorgehensweise

Die Vorgehensweise in den folgenden Kapiteln ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

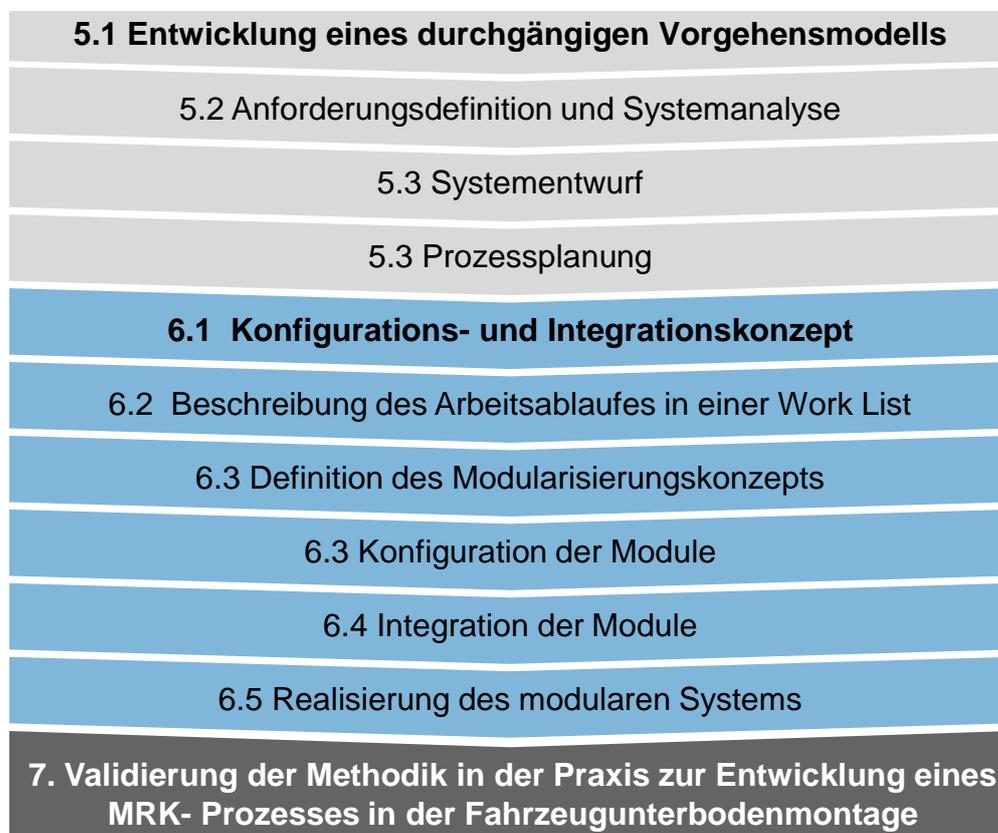


Abbildung 4.3: Vorgehensweise zur Entwicklung der Methodik

Grundlage zur Entwicklung der Methodik sind die definierten Anforderungen aus Kapitel 4.1. Kapitel 5 beginnt mit der Konzeption der durchgängigen Vorgehensmodells und der Einordnung in den Planungsprozess eines Montagesystems. Die Methodik enthält die Teilschritte:

- Analyse und Anforderungsdefinition des (Teil-)Produktes
- Systementwurf
- Technische Realisierung
- Integration

Die ersten beiden Teilschritte werden in Kapitel 5 im Detail entwickelt und beschrieben. Zur Erfassung der prozessrelevanten Hauptmerkmale wird zuerst eine Vorgehensweise zur Anforderungsdefinition und Systemanalyse beschrieben. Darauf folgt der Ablauf des Systementwurfs. Dieser resultiert in einer lösungsneutralen Beschreibung der Verantwortlichkeiten. Es schließt sich die Prozessplanung und -ablaufgestaltung an. Hier wird dargestellt wie die Aufgaben aufgeteilt werden und wie der Arbeitsraum gestaltet werden kann. Das Ergebnis ist eine Liste der Aufgaben, welche durch das automatisierte System durchzuführen sind zusammen mit den zugehörigen Unterverantwortlichkeiten.

Kernbereich der Arbeit bildet das in Kapitel 6 entwickelte modulare Konfigurations- und Integrationskonzept. Hierzu wird zunächst die Struktur einer Work List zur Beschreibung des Arbeitsablaufes erläutert. Diese greift die Ergebnisse des Systementwurfs und der Prozessplanung auf und stellt sie in strukturierter Form dar. Anschließend wird der Aufbau des Modulbaukastens vorgestellt und beschrieben, wie ausgehend von der vorherigen Modulbeschreibung die technische Lösungsfindung durchgeführt werden kann. Im Anschluss erfolgen die Beschreibung der Integration der Komponenten im Steuerungskonzept und die physische Zusammenführung der Elemente zu einem Gesamtsystem. In Kapitel 6.6 erfolgt dann die Beschreibung der Realisierung des Systems. Hierzu werden eine softwaregestützte Konfiguration und Benutzerinteraktion sowie ein Steuerungskonzept beschrieben. Das Konfigurationstool unterstützt den Planer bei der Erstellung der Work List und der darauf folgenden Auswahl geeigneter Modulausprägungen. Ergebnis ist eine Work List als Arbeitsablaufbeschreibung und Datensätze, welche in die Steuerung übertragen werden. Die dynamische Benutzerschnittstelle dient dem Anlagenintegrator zur Parametrierung und dem Testen des Systems und wird während des späteren Prozessablaufes als Mensch-Maschine Schnittstelle genutzt. Sie soll eine Kommunikation zwischen Mensch und Maschine und die Überwachung und Anpassung des Arbeitsablaufes ermöglichen. Das Steuerungskonzept gestattet die flexible Implementierung der Module in die Prozesssteuerung und steuert den Prozessablauf. Als Input hierzu dienen die Work List und die vom Konfigurator erstellte Datensätze.

In Kapitel 7 erfolgt dann die praktische Validierung der Methodik an dem Prozess der Montage einer Unterbodenverkleidung eines Fahrzeuges. Die Methodik wird in ihrer Gesamtheit angewandt und ausgehend von der Analyse werden ein Montageprozess und die zugehörige Montaganlage entwickelt und in einem praktischen Aufbau in der Demonstratorfabrik dargestellt.

5 Vorgehen zum Systementwurf

5.1 Entwicklung eines durchgängigen Vorgehensmodells

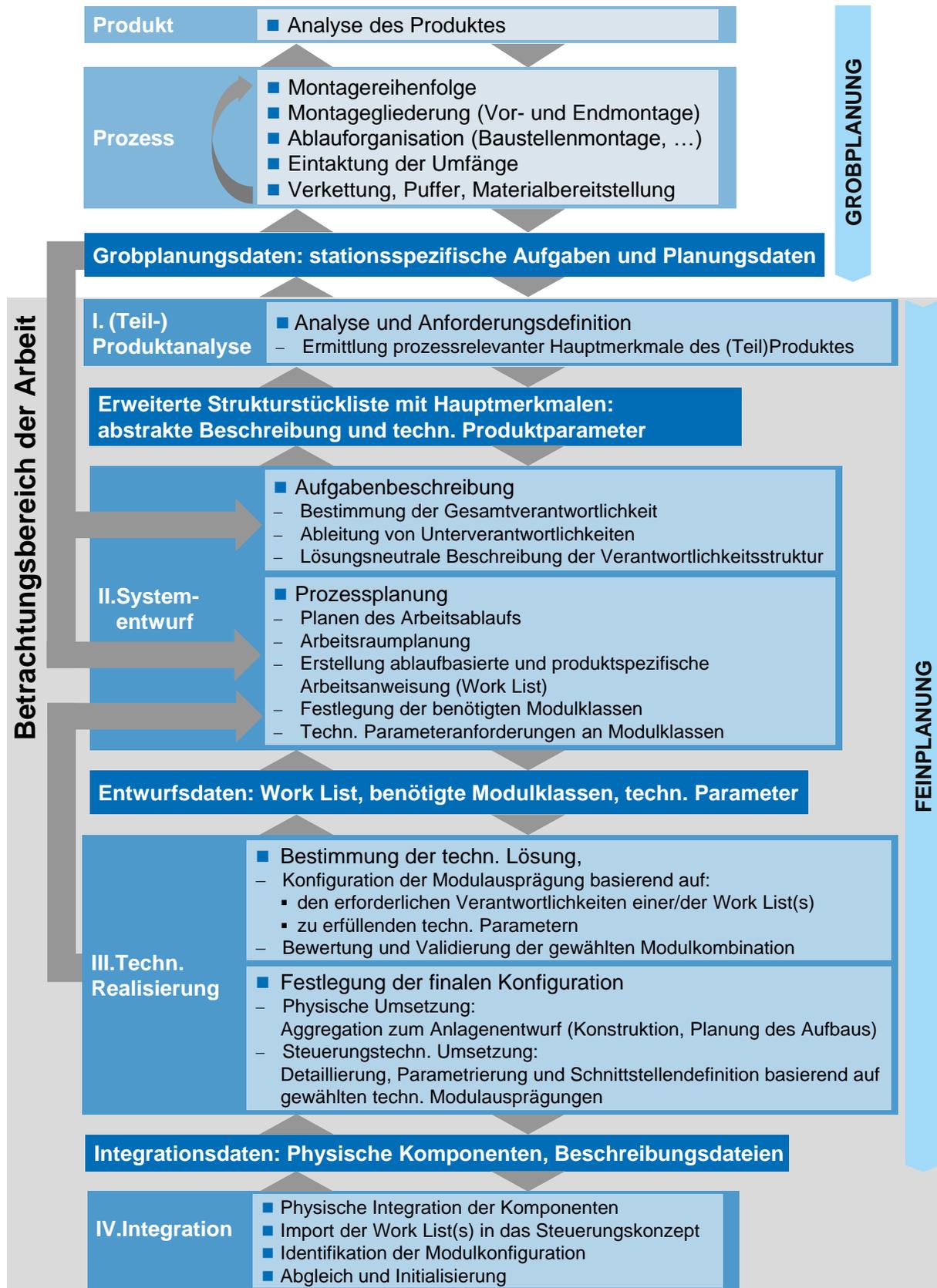


Abbildung 5.1: Vorgehensmodell zur Planung einer Montagestation

Zur durchgängigen Planung und Integration eines wandlungsfähigen und angepassten Montageprozesses wird das in Abbildung 5.1 gezeigte Vorgehensmodell entwickelt.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Systementwurf sowie der technischen Realisierung und Prozessausführung für ein Subsystem 3. Ordnung (Vgl. Kap 4.2). Die dargestellten Schritte der Grobplanungsphase werden daher nicht im Detail betrachtet. Als Eingangsgrößen für das Vorgehensmodell werden die Ergebnisse der Grobplanung genutzt. Benötigt werden die durchzuführenden Aufgaben der zu planenden Prozessstation. Ebenso verwendet werden Angaben zur Taktzeit, der verfügbaren Fläche, Art der Materialbereitstellung sowie der Gliederung und Ablauforganisation.

Die folgende Vorgehensweise zur Feinplanung und Integration lässt sich in vier Teilschritte gliedern

I. Analyse und Anforderungsdefinition des (Teil-)Produktes

In diesem Schritt werden die relevanten Komponenten des Produktes, welche Teil des zu planenden Prozesses sind, analysiert. Ergebnis der Analyse ist die Erfassung der prozessrelevanten Hauptmerkmale. Diese werden nach abstrakten Beschreibungsmerkmalen wie z.B. die Beschaffenheit der zu montierenden Teile, die Art der Fügemitel, die Zugänglichkeit und Erreichbarkeit des Montageortes unterteilt. Des Weiteren werden techn. Parameter wie z.B. Gewicht und Größe der Teile oder benötigte Drehmomente beschrieben.

II. Systementwurf

Der Systementwurf lässt sich in zwei Phasen untergliedern. Zu Beginn erfolgt eine Aufgabenbeschreibung. Die Hauptmerkmale werden gemeinsam mit den Ergebnissen der Grobplanung genutzt, um die durchzuführende Gesamtaufgabe zu definieren. Hierzu wird zuerst die Gesamtverantwortlichkeit beschrieben und im Anschluss Unterverantwortlichkeiten abgeleitet. Es wird eine objektorientierte Vorgehensweise genutzt, welche die Verantwortlichkeiten als notwendige Methoden definiert.

Dies ermöglicht eine strukturierte Darstellung der Unterverantwortlichkeiten mit ihren Verknüpfungen und eine lösungsneutrale Beschreibung. Ergebnis ist eine Systembeschreibung, welche die benötigten Verantwortlichkeiten zur Erfüllung der Gesamtverantwortlichkeit enthält.

Diese Beschreibung wird in der zweiten Phase genutzt, um eine Prozessplanung durchzuführen. Zuerst erfolgt eine Planung des Arbeitsablaufes. Hierzu wird ein prozeduraler Ablauf festgelegt und anschließend die Aufgaben dem Mensch oder dem Automatisierungssystem zugeordnet. Danach erfolgt eine räumliche Planung des Arbeitsbereiches. D.h. es wird bestimmt an welcher Stelle sich welche Komponenten befinden und wer sich zu welchem Zeitpunkt im Arbeitsraum an welchem Ort aufhält.

Innerhalb dieses Vorgehensmodells liegt der Fokus auf der Planung des Ablaufes und der Implementierung des automatisierten Systems. Auf die Ausgestaltung und Planung der manuellen Umfänge wird daher nicht näher eingegangen.

Im Folgenden wird aus den zugewiesenen Aufgaben des automatisierten Systems eine sogenannte Work List erstellt. Diese ist vergleichbar mit einer Arbeitsbeschreibung für einen manuellen Arbeitsplatz. Sie enthält ablaufbasiert alle Unterverantwortlichkeiten die durch das automatisierte System erfüllt werden müssen. Die Beschreibung erfolgt derart, dass eine Implementierung in das Steuerungssystem der Prozessstation erfolgen kann. Für jede zu produzierende Variante wird eine spezifische Work List erzeugt.

Aus der objektorientierten Beschreibung der Unterverantwortlichkeiten wird zunächst bestimmt, welche Modulklassen benötigt werden, um diesen nachzukommen. Die Modulklassen stehen in einem Baukasten zur Verfügung und werden entsprechend ihrer verfügbaren Methoden zur Erfüllung der Unterverantwortlichkeit ausgewählt. Des Weiteren werden die zuvor definierten technischen Parameter aus der Produktanalyse mit weiteren Parametern aus der Prozessplanung vervollständigt (bspw. benötigte Reichweiten, Genauigkeiten bei Messungen etc.)

Als Ergebnis des Systementwurfes wird im nächsten Schritt die erstellte Work List zusammen mit einer Liste der Modulklassen und der relevanten technischen Parameter übergeben.

III. Technische Realisierung

Die technische Realisierung erfolgt wiederum in mehreren Teilschritten. Zu Beginn wird innerhalb der notwendigen Modulklassen die Modulausprägung bestimmt, welche in der Lage ist sowohl die Verantwortlichkeit als auch die technischen Anforderungen zu erfüllen. Dies kann analog zur Instanziierung einer Klasse bei der Programmierung verstanden werden. D.h. aus der Klasse des ausgewählten Moduls wird ein Objekt erzeugt, das die Anforderungen erfüllt. Hierzu wird eine Datenbank genutzt, welche die einzelnen Modulausprägungen enthält und eine Zuordnung über eine systematische Beschreibung ermöglicht. Ist beispielweise eine Modulklass notwendig, die einen Endeffektor positionieren soll, kann in der Datenbank ein geeigneter Roboter ausgewählt werden, welcher die benötigte Reichweite und Traglast aufweist.

Nachdem alle Modulausprägungen bestimmt sind, kann eine Bewertung der vorliegenden Konfiguration nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten erfolgen. Dies wird iterativ durchgeführt, indem in mehreren Durchläufen unterschiedliche Aufgabenumfänge dem automatisierten System zugewiesen werden und anhand der resultierenden Konfiguration die wirtschaftlichste Lösung ausgewählt wird. Ist die finale Konfiguration bestimmt, erfolgt die Aggregation zu einem Komplettsystem. Hierzu wird der Aufbau innerhalb der Station geplant und eine konstruktive Umsetzung durchgeführt. Zur steuerungstechnischen Umsetzung erfolgen Parametrierungen und die Definition der verwendeten Schnittstellen. Nach Abschluss dieser Umfänge werden Datensätze zur Integration in die Steuerung abgeleitet.

Als Ergebnis der technischen Realisierung erhält man Modulausprägungen als physische Anlagenkomponenten, welche auf Grundlage der durchgeführten Konstruk-

tion zusammengefügt werden. Zur steuerungstechnischen Umsetzung liegen Datensätze und Work Lists vor. Die Anlagentopologie ist also gleichsinnig im physischen Aufbau und in der Anlagensteuerung vorhanden.

IV. Integration

Im letzten Schritt erfolgt die praktische Implementierung. Hierzu werden die Komponenten in der Prozessstation aufgebaut. Die steuerungstechnische Umsetzung erfolgt durch Integration der Datensätze in ein Steuerungssystem. Dieses System ist in der Lage auf Grundlage der vorhandenen Datensätze eine Selbstidentifikation durchzuführen und sich selbstständig zu konfigurieren. Zur Aufgabendurchführung wird eine Work List geladen. Das Steuerungssystem gleicht diese mit der verfügbaren Konfiguration ab und führt die Aufgaben aus, wenn alle Verantwortlichkeiten durch die eingefügten Module erfüllt werden. Die Aufgabenverteilung erfolgt nach dem serviceorientierten Architekturmuster. Datenverbindungen zu den Einzelkomponenten werden durch geräteunabhängige Standardapplikationen ermöglicht. Durch diesen Aufbau ist eine flexible (Re-)Konfiguration möglich, indem die physischen Komponenten getauscht werden und der entsprechende Datensatz implementiert wird. Eine variable Aufgabendurchführung ist durch den Wechsel der Work List möglich. Diese kann variantenspezifisch erstellt werden und wird im Sinne eines Produktgedächtnisses geladen, wenn die entsprechende Variante produziert wird.

In den folgenden Unterkapiteln werden die ersten beiden Teilschritte der Methodik erläutert. Als Anschauungsbeispiel wird der Montageprozess der Fahrzeugräder dargestellt.

Die Teilschritte III und IV stellen die Hauptpunkte der Methodik dar. Sie werden in Kapitel 6 detailliert beschrieben.

5.2 Definition der relevanten (Teil-)Produktmerkmale

In diesem Kapitel wird der erste Teilschritt des Vorgehensmodells dargestellt. Ziel ist die Ableitung der prozessrelevanten Hauptmerkmale, welche sich aus dem Aufbau und den Komponenten des zu montierenden Produktes ergeben. Diese Merkmale bilden im Sinne der in Kapitel 2.2.2 vorgestellten Methoden die Anforderungen. Das Vorgehen lehnt sich dabei an die in Kapitel 2.2.1 vorgestellten Methoden des Requirement Engineerings an. Als Grundlage zur Visualisierung werden die in der Montageplanung gebräuchlichen Darstellungsarten des Struktur-/Variantenbaumes und der Strukturstückliste verwendet.

Wie im Vorgehensmodell (Abbildung 5.1) dargestellt, sind die Eingangsdaten des ersten Schrittes (Teil-)Produktanalyse die Ergebnisse der vorherigen Grobplanung. Zunächst werden aus der Liste der durchzuführenden Aufgaben in der geplanten Montagestation die zu montierenden Teilkomponenten bestimmt und eine stationsspezifische Stückliste erstellt. Im ersten Schritt werden die spezifischen Eigenschaften der Bauteile erfasst. Wichtig ist hierbei Bauteilgröße, geometrische Gestalt (Abmessungen und Lage relevanter Punkte bspw. Schraubpunkte), Material, Gewicht und Oberfläche.

Zur Visualisierung kann diese Stückliste in einen Strukturbaum übertragen werden. Der Aufbau ist exemplarisch in Abbildung 5.2 am Beispiel eines Kompletttrades zu sehen.

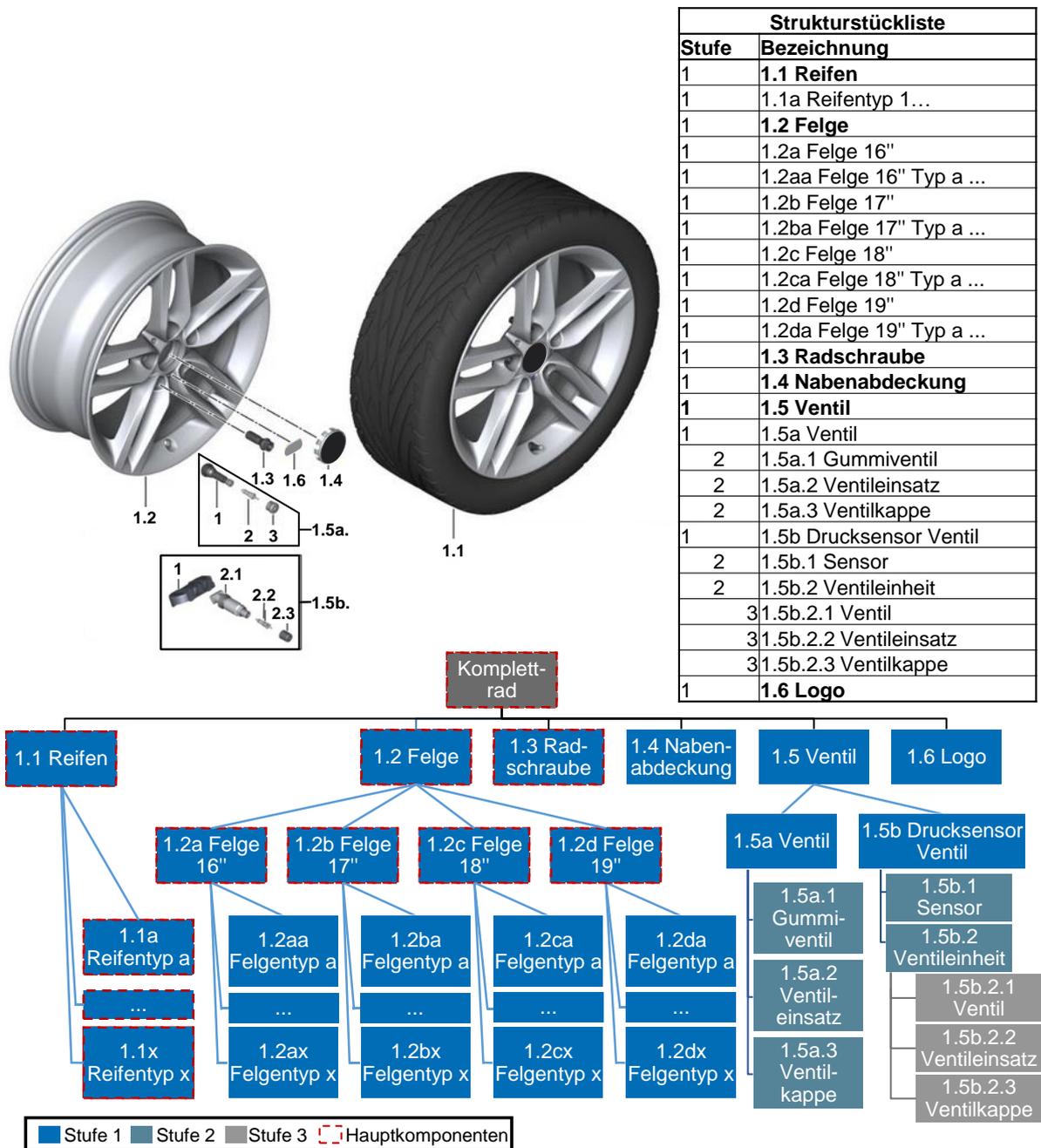


Abbildung 5.2: Strukturstückliste und Strukturbaum am Beispiel der Radmontage

Die Einzelteile oder Baugruppen sind entsprechend ihrer Stufe angegeben und können wie in dem Strukturbaum zu sehen untergliedert werden. Die nächste Stufe wird durch eine zusätzliche Zahl ausgedrückt.

Ebenso kann ein Eintrag der unterschiedlichen Varianten durch einen Buchstaben erfolgen. Hier wird beispielsweise bei den Felgen eine Unterscheidung zwischen den Felgengrößen und dem Felgentyp getroffen. Dies wird genutzt, um den Einfluss der Varianten auf den späteren Arbeitsablauf bewerten zu können und bei Bedarf eine

separate variantenspezifische Work List anzulegen. Für das hier verwendete Beispiel der Rädermontage sind die Parameter Reifentyp, Felgenreöße und die Radbolzen entscheidend für die Prozessplanung. Diese werden daher als Hauptkomponenten definiert und im Folgenden weiter detailliert.

Die Strukturstückliste wird nun folgend mit Informationen angereichert. Diese beschreiben die zu berücksichtigenden Merkmale der Einzelkomponenten bei der Montage und dem Zusammenbringen mit den weiteren Produktkomponenten zur Erfüllung der Kundenanforderungen. Die Informationen werden als Beschreibungen hinterlegt, wie z.B. gleichmäßige Spalte und technische Produktparameter z.B. vorgegebenes Schraubmoment.

Als Ergebnis liegt für jedes Bauteil eine Beschreibung seiner spezifischen Eigenschaften sowie der relevanten Parameter zur Montage der Bauteile miteinander vor. Ein Beispiel ist in Abbildung 5.3 angegeben.

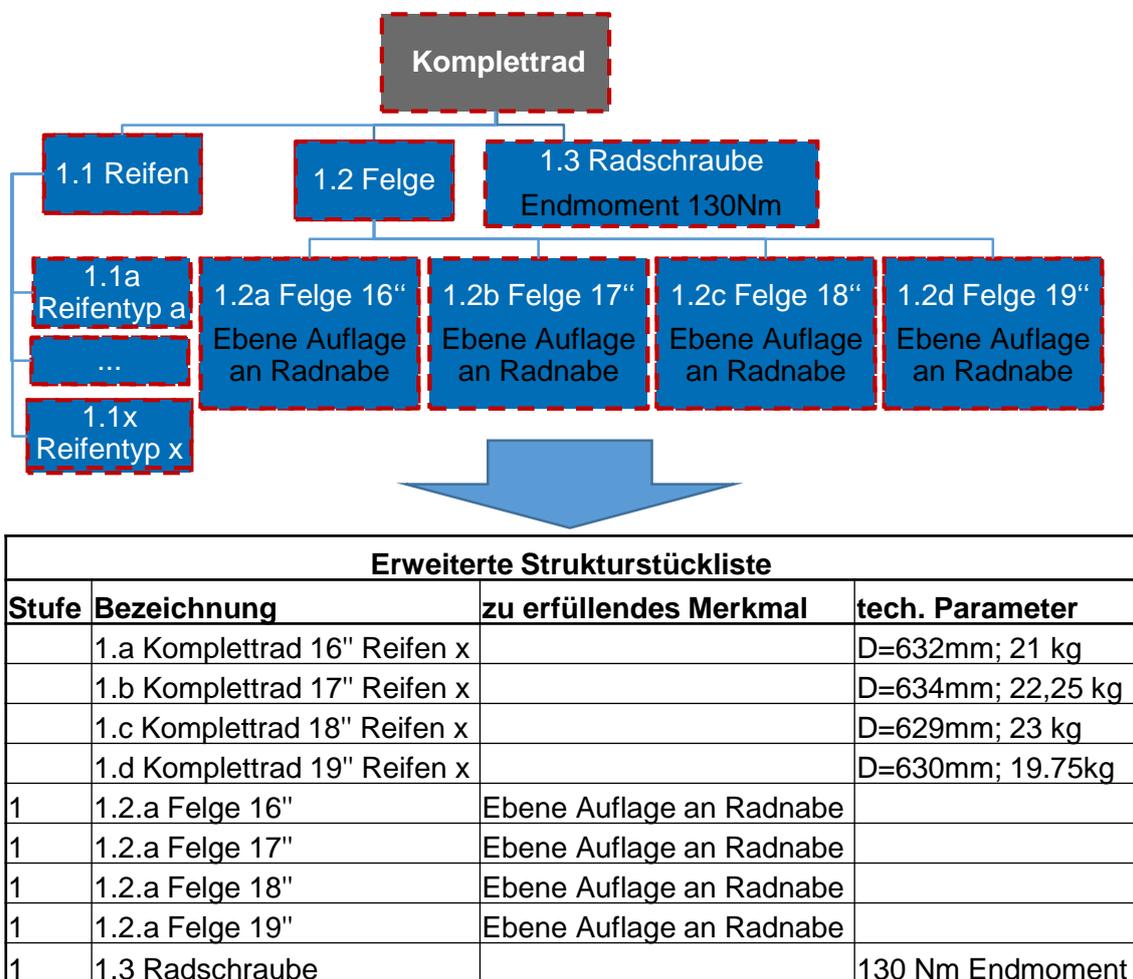


Abbildung 5.3: Strukturbaum und erweiterte Strukturstückliste

Wichtig für die Rädermontage sind im Wesentlichen die Parameter:

- Felge/Reifen→Komplettrad: Durchmesser und Gewicht des Rades zur Zuführung, ebene Auflage des Rades auf der Radnabe/Bremsschreibe
- Radschraube: Erreichen des Endmomentes

5.3 Durchführung des Systementwurfs

In diesem Kapitel wird der zweite Schritt des durchgängigen Vorgehensmodells beschrieben. Im Folgenden wird zunächst die Vorgehensweise zur Erstellung des Systementwurfs basierend auf den Informationen der definierten Produkthauptmerkmale und den Grobplanungsdaten beschrieben. Begonnen wird mit der Ableitung der Verantwortlichkeiten. Diese werden untergliedert und strukturiert dargestellt. Anhand der erstellten Struktur ergibt sich eine lösungsneutrale Systementwurfsbeschreibung.

5.3.1 Beschreibung der Verantwortlichkeiten

Als Basis für den Systementwurf dient die Bestimmung von Verantwortlichkeiten. Die Vorgehensweise ist angelehnt an die objektorientierte Analyse, die Planungsmethodik von Müller et al. sowie VDI 2803 und Axiomatic Design (Vgl. [BAL97; MUE11b; SUH01; VDI 2803]).

Eingangsdaten sind die Ergebnisse der Grobplanung sowie der (Teil-)Produktanalyse. Ausgehend von der zu erfüllenden Gesamtverantwortlichkeit werden Unterverantwortlichkeiten definiert. Die Beschreibung dieser wird hierbei anhand eines relevanten Bauteils zusammen mit einem Verb vorgenommen (Vgl. [MUE11b; VDI 2803]). Die Darstellung erfolgt auf der Ebene von Montageoperationen bzw. -teilaufgaben wie bspw. Rad verschrauben oder Rad zuführen. Dies ermöglicht eine angemessene Abstraktionsebene ohne eine zu starke Unterteilung. Im Zuge der späteren technischen Realisierung können die Verantwortlichkeiten weiter bis hin zu elementaren Lösungs- bzw. Wirkprinzipien zerlegt werden, um geeignete Betriebsmittel zuweisen zu können. (Vgl. [VDI 2221])

Analog zu der Vorgehensweise des Axiomatic Designs und der objektorientierten Analyse soll hierdurch eine Abstraktion des Gesamtumfangs in relevante Teile erreicht werden. Die identifizierten (Teil-)Produktanforderungen werden abstrahiert und als Einzelverantwortlichkeit dargestellt (Vgl. [BAL97; SUH01]). Durch diese Unterteilung wird es möglich entsprechend dem in Abbildung 2.7 dargestellten modularen Systemaufbau jeder Verantwortlichkeit ein Modul zuzuordnen. Dies erlaubt die Einhaltung des Unabhängigkeitsaxioms und ermöglicht eine strukturierte Lösungsfindung (Vgl. Kapitel 2.2.2).

Ein weiterer großer Vorteil dieser Vorgehensweise ist die lösungsneutrale Darstellung. Die Systemstruktur kann beschrieben werden ohne eine spezifische technische Umsetzung zu betrachten, hierdurch können Einschränkungen des Lösungsraums vermieden werden. Später erfolgt eine unabhängige Zuordnung der Aufgaben zu manuellen oder automatisierten Prozessen und eine zielgerichtete Systemgestaltung ohne Doppelungen oder Funktionsüberfrachtung ist sichergestellt. Die direkte Verknüpfung von Anforderungen und Verantwortlichkeiten ermöglicht hierbei ein hohes Maß an Rekonfigurierbarkeit und Skalierbarkeit.

5.3.2 Erstellung des lösungsneutralen Systementwurfs

Der Systementwurf orientiert sich an der Vorgehensweise der VDI 2206 und 2221 (Vgl. Kapitel 2.2.2, [VDI 2206; VDI 2221]). Ziel ist die Erstellung eines allgemeinen, domänenübergreifenden Systementwurfes, welcher die zu erfüllenden Verantwortlichkeiten und ihre Zusammenhänge strukturiert beschreibt.

Zur Definition der benötigten Verantwortlichkeiten wird wie in Kapitel 5.3.1 beschrieben mit der Gesamtverantwortlichkeit begonnen. Diese wird aus den Grobplanungsdaten übernommen bspw. Montage des Kompletttrades. Diese Gesamtverantwortlichkeit wird strukturiert untergliedert. Hilfsmittel hierzu ist der Funktionenbaum/hierarchische Aufgabenanalyse (HTA), welche in Abbildung 5.4 dargestellt ist (Vgl. Kapitel 2.2.1 und [VDI 2803]). Alle zuvor definierten Hauptkomponenten werden mit ihren prozessrelevanten Hauptmerkmalen berücksichtigt. Die benötigten nicht wertschöpfenden Tätigkeiten wie bspw. das Zuführen von Teilen werden ebenfalls mit aufgenommen.

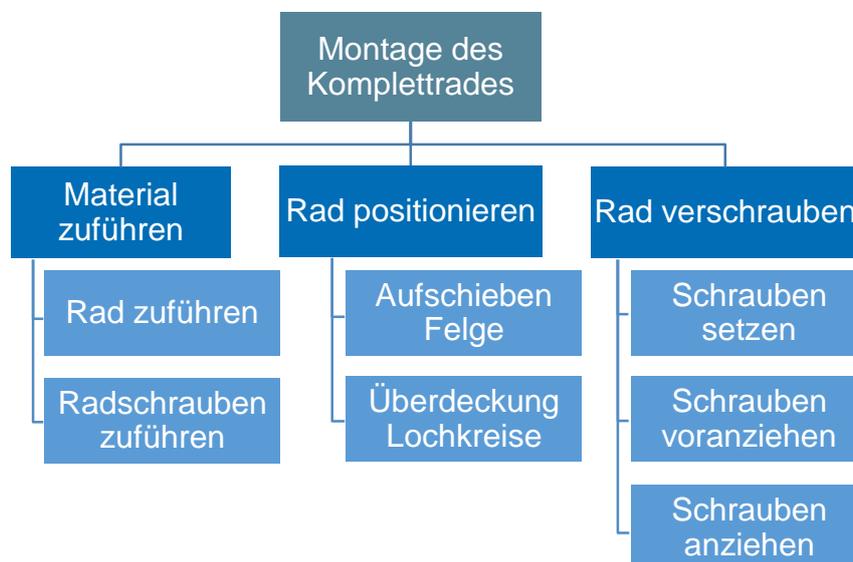


Abbildung 5.4: Funktionsbaum / hierarchische Aufgabenanalyse

Wichtig ist hierbei, dass diese Strukturierung der Verantwortlichkeiten zunächst nur als Dekomposition von Verantwortlichkeiten einer höheren Ebene durchgeführt wird und noch keine prozedurale Beschreibung erfolgt. Als Ergebnis steht eine Verantwortlichkeitsstruktur mit den vollständig unterteilten Unterverantwortlichkeiten.

Mithilfe dieser Struktur kann die Beschreibung des Systementwurfes erfolgen. Es wird eine genaue Darstellung der Unterverantwortlichkeiten und ihrer Komposition zur Erfüllung der definierten Anforderungen gegeben. Ebenso können Zusammenhänge und eventuelle Wechselwirkungen nachvollzogen werden. Dies ermöglicht eine Überprüfung und Optimierung in einem frühen Entwurfsstadium. Nach Abschluss der Optimierungen erhält man einen Systementwurf, welcher die gestellten Anforderungen in möglichst einfacher Weise erfüllt und die zur weiteren Entwicklung benötigten Verantwortlichkeiten. Dieser Teilschritt trägt maßgeblich zur Durchgängigkeit der Methodik bei, da eine direkte Verknüpfung der Anforderungen mit den Gestaltungsparametern (Verantwortlichkeiten) des zu entwickelnden Montagesystems erfolgt. Die Auswirkung von

Änderungen auf der Produktseite und der notwendige Änderungsbedarf des Montage-systems kann einfach nachverfolgt werden.

In der nun folgenden Prozessplanung kann auf der Grundlage des Systementwurfs eine Aufgabenzuweisung und Prozessgestaltung erfolgen.

5.4 Vorgehensweise zur Prozessplanung

In diesem Kapitel wird der zweite Teil des Schrittes Systementwurf des Vorgehensmodells erläutert. Hierzu wird zunächst mit einer allgemeingültigen Prozessbeschreibung begonnen. Der zuvor generierte Systementwurf wird genutzt und mit den Informationen der Grobplanung erweitert, um einen prozeduralen Ablauf zu erhalten. Dies dient als Grundlage für die Aufgabenzuteilung zu Mensch und automatisiertem System und der Planung des Arbeitsraumes. Mit den Ergebnissen wird eine Ablaufplanung und Beschreibung des Gesamtprozesses vorgenommen und relevante technische Parameter für das automatisierte System abgeleitet.

5.4.1 Beschreibung des Montageprozesses

Der zuvor erstellte Systementwurf bildet die zu erfüllenden Unterverantwortlichkeiten mit ihren Zusammenhängen ab. Nun wird mithilfe der Informationen aus der Grobplanung und der im ersten Teilschritt erstellten erweiterten Strukturstückliste ein allgemeiner prozeduraler Ablauf festgelegt. Durch eine Analyse der Strukturstückliste und der Verantwortlichkeitsstruktur können Reihenfolgen bestimmt werden, welche während des Montageprozesses eingehalten werden müssen. Zur Darstellung des prozeduralen Ablaufs wird eine Kombination aus der Operationsreihenfolge und dem FAST-Diagramm (Vgl. [VDI 2803]) verwendet, wie in Abbildung 5.5 dargestellt. Hierbei wird die Operationsreihenfolge um erwünschte und unerwünschte Merkmale erweitert, welche während der Erfüllung der Unterverantwortlichkeiten relevant sind. Diese Merkmale ergeben sich durch die zuvor durchgeführte Produktanalyse und werden um prozessrelevante Merkmale erweitert. Die Darstellungsart erlaubt eine Verknüpfung der Prozessreihenfolge mit den relevanten Merkmalen in jedem Teilschritt. In den folgenden Schritten können die Informationen genutzt werden, um die notwendigen Module und die jeweilige Modulusprägung zu bestimmen. Die gewählten Ausprägungen sollen die benötigten Unterverantwortlichkeiten als auch die notwendigen Merkmale erfüllen und geeignet sein die potentiell auftretenden unerwünschten Merkmale zu vermeiden.

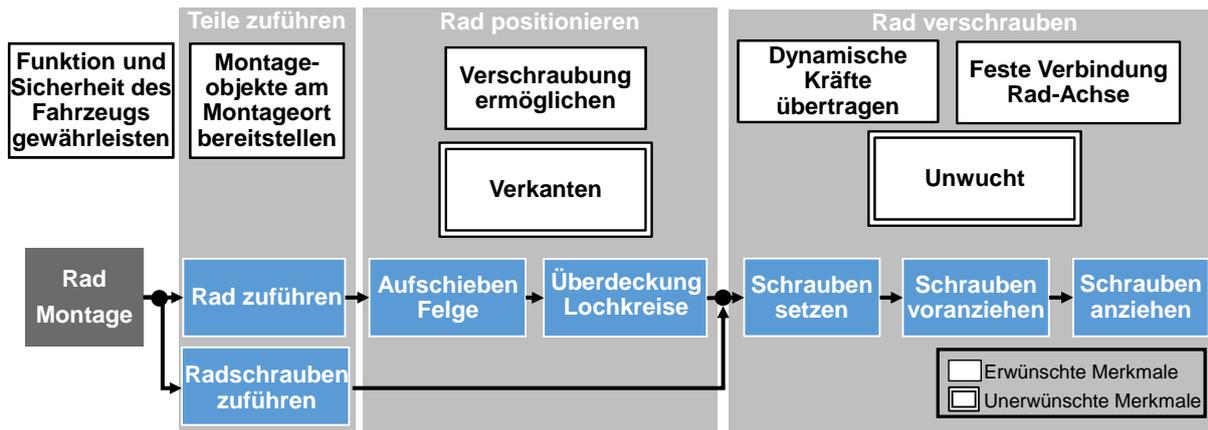


Abbildung 5.5: Operationsreihenfolge mit Merkmalsbeschreibung

In diesem Beispiel wird zunächst die Gesamtverantwortlichkeit und das zu erzielende Merkmal der Radmontage dargestellt. Als erster Schritt der Durchführung erfolgt die Bereitstellung der Teile. Im folgenden Ablauf der Positionierung soll eine Ausrichtung des Rades erfolgen, sodass eine anschließende Verschraubung ermöglicht und ein Verkanten vermieden wird. Der folgende Schraubprozess soll eine feste Verbindung und Kraftübertragung ermöglichen ohne eine Unwucht zu erzeugen.

Das Ergebnis dieses Planungsschritts ist eine Komplettübersicht der Verantwortlichkeiten in Kombination mit frühest und spätest Bedingungen ihrer Ausführung. Diese Übersicht wird genutzt, um die Tätigkeiten manuellen oder automatisierten Prozessen zuzuordnen und eine jeweilige Prozessabfolge zu bestimmen.

5.4.2 Zuteilung der Verantwortlichkeiten und Arbeitsraumplanung

Aufteilung der Verantwortlichkeiten zwischen Mensch und automatisiertem System

Die Prinzipien zur Aufgabenteilung sind in Kapitel 2.1.2 beschrieben. Die Aufgaben werden nach den folgenden Kriterien zugewiesen:

- **Fähigkeitsbasiert:** Auf Grundlage der spezifischen, kognitiven Fähigkeiten von Mensch und Roboter.
- **Qualitätsbasiert:** Qualitäts- bzw. sicherheitsrelevante Prozesse sollen aufgrund der höheren Reproduzierbarkeit und Rückverfolgbarkeit möglichst automatisiert durchgeführt werden.
- **Variantenbasiert:** Variantenübergreifende Standardprozesse sollen automatisiert, selten auftretende oder sich häufig ändernde Prozesse manuell ausgeführt werden.
- **Ergonomiebasiert:** Prozesse, welche für den Mitarbeiter ergonomisch sehr nachteilig sind, sollten möglichst automatisiert oder durch eine entsprechende Assistenz unterstützt werden (Handlinggerät, Hebehilfe etc.)

Wie in folgender Abbildung 5.6 dargestellt können die Verantwortlichkeiten einzeln, nach den Kriterien welche in Kapitel 2.1.2 beschrieben wurden, bewertet und dem Ergebnis entsprechend zugeordnet werden.

Verantwortlichkeit	Erforderliche spezifische Fähigkeiten	Kognitions Level	Variantenabhängigkeit	Sicherheits/Qualitätsrelevanz	Ergonom. Belastung	Mögliche Zuordnung
Rad-schrauben zuführen	Aufgabe geringer Komplexität, immer in gleicher Art auszuführen, keine komplexen Bewegungen oder Anpassungen nötig	gering	gering	gering	gering	automat.
Rad zuführen	Aufgabe höherer Komplexität, unterschiedliche Raddurchmesser zu berücksichtigen	mittel	hoch	gering	hoch	manuell unterstützt
Auf-schieben Radnabe	Aufgabe höherer Komplexität, teilweise je nach Lage Ausgleichsbewegungen und Anpassungen nötig, um Verkanten zu verhindern	mittel	gering	gering	mittel	manuell unterstützt
Über-deckung Lochkreis sicherstellen	Aufgabe höherer Komplexität, teilweise je nach Lage Ausgleichsbewegungen und Anpassungen nötig, um Verkanten zu verhindern, Anlage sicherstellen	mittel	gering	gering	gering	manuell
Schrauben setzen	Aufgabe geringer Komplexität, immer in gleicher Art auszuführen, keine komplexen Bewegungen oder Anpassungen nötig	gering	gering	gering	gering	automat.
Schrauben vor-anziehen	Immer in gleicher Weise durchzuführen, Verkanten der Verschraubung verhindern, gleichmäßiges Vormoment erreichen	mittel	gering	mittel	mittel	automat.
Schrauben anziehen	Immer in gleicher Weise durchzuführen, gleichmäßiges Endmoment und Anlage sicherstellen	mittel	gering	hoch	mittel	automat.

Abbildung 5.6: Beschreibung und Zuordnung der Verantwortlichkeiten

Die Zuordnung der Verantwortlichkeiten ist ein iterativer Prozess welcher in Teamarbeit ausgeführt werden kann (Vgl. [MUE16]). Ziel ist die bestmögliche Nutzung der Fähigkeiten der Interaktionspartner und eine optimale Kostenverteilung zwischen Investition in Automatisierung und den Kosten manueller Arbeit. Als Ergebnis dieses Planungsschrittes steht eine Zuteilung der durchzuführenden Verantwortlichkeiten zu manuellen und automatisierten Prozessen fest.

Arbeitsraumplanung

Die Arbeitsraumplanung erfolgt auf Grundlage der zugeordneten Verantwortlichkeiten an Mensch und automatisiertes System und den Vorgaben der Grobplanung. Relevant sind hier die gewählte Ablauforganisation mit dem evtl. zugehörigen Transportsystem

und die Materialbereitstellung. Hieraus ergeben sich die notwendigen Wege und die Zugänglichkeit zum Montageobjekt. Aus der Verantwortlichkeitszuordnung können wesentliche Informationen abgeleitet werden, welche die Form der Mensch-Maschine-Kooperation bestimmen (Vgl. Kapitel 3.2). Basierend auf der Form der Zusammenarbeit müssen die Arbeitsräume aufgeteilt werden. Die Zugänglichkeit zum Montageobjekt und vor allem die Sicherheit der Mitarbeiter müssen dabei gewährleistet sein. Die Vorgehensweise zur Sicherheitsabnahme ist in Kapitel 3.2.2 beschrieben. Kollaborierende Prozesse sind hierbei sicherheitstechnisch sehr komplex, aufgrund der gleichzeitigen Tätigkeit von Mensch und Roboter am gleichen Ort. Bei der kooperierenden, synchronisierten oder koexistierenden Zusammenarbeit muss der Arbeitsraum zwischen Mensch und Roboter so aufgeteilt werden, dass Tätigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder an verschiedenen Orten ausgeführt werden (Vgl. Kapitel 3.2.2).

Das Ergebnis der Arbeitsraumplanung und Sicherheitsabnahme ist eine Vorgabe zur sicheren Aufteilung des Arbeitsraums zwischen Mensch und Maschine. Entsprechend den Ergebnissen können zusätzliche zu erfüllende Verantwortlichkeiten abgeleitet werden, welche die Auslegung von Sicherheitstechnik betreffen, um beispielsweise den Arbeitsraum eines Roboters zu überwachen. In Abbildung 5.7 ist eine beispielhafte Darstellung einer Arbeitsraumaufteilung gezeigt.

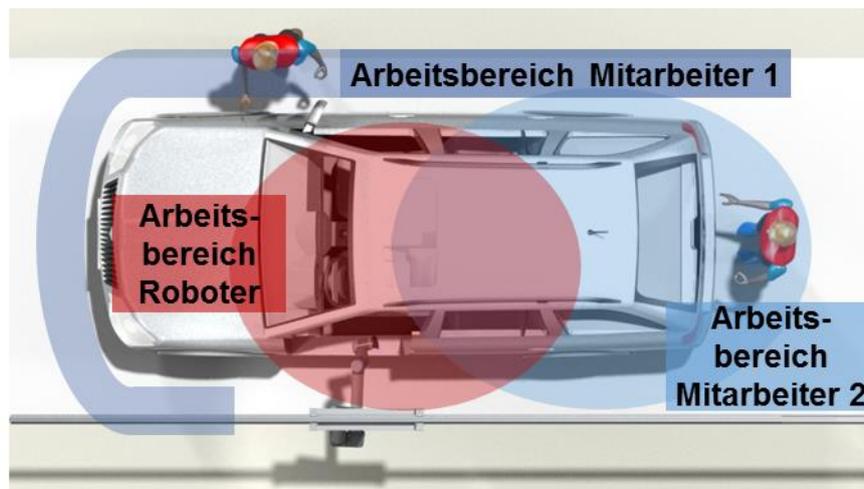


Abbildung 5.7: Aufteilung des Arbeitsraums in der Prozessstation

Das Vorgehen zur Planung des Arbeitsraumes ist im Zuge des Validierungsszenarios an einem Beispiel detailliert beschrieben (siehe Kapitel 7.3.2).

5.4.3 Ablaufplanung und Gesamtprozessbeschreibung

Nach erfolgter Verantwortlichkeitszuweisung und Arbeitsraumaufteilung kann eine Beschreibung des Gesamtprozesses und Prozessablaufes vorgenommen werden. Zur finalen Aufteilung der Verantwortlichkeiten können weitere organisatorische Gesichtspunkte wie beispielsweise die Stationsauslastung berücksichtigt werden. Um eine zeitliche Visualisierung der Abläufe zu erhalten, kann ein Tabelle wie in Abbildung 5.8 beispielhaft dargestellt verwendet werden.

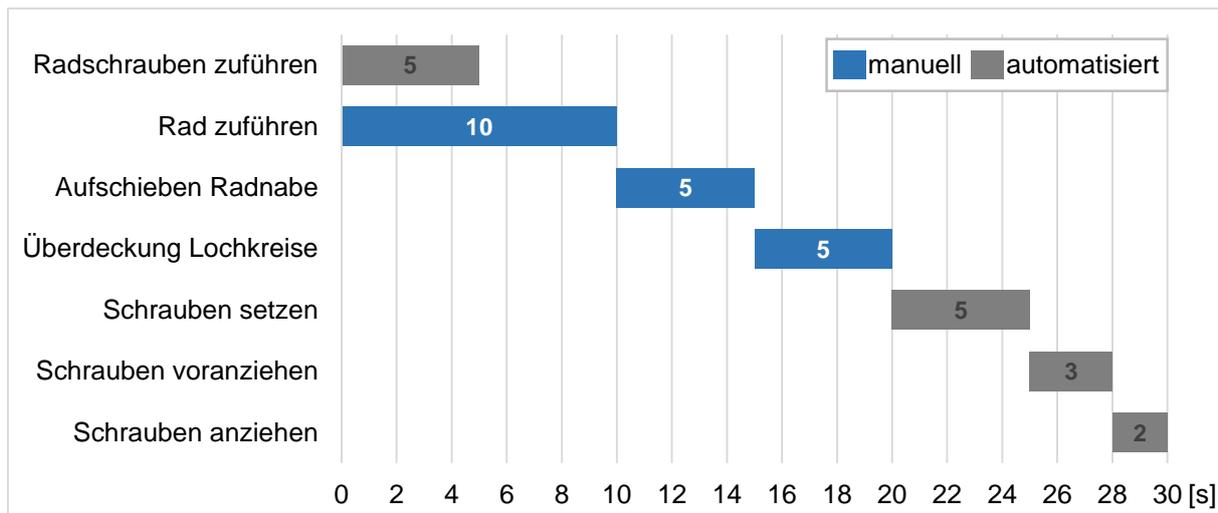


Abbildung 5.8: Zeitlicher Ablauf in der Prozesstation

Diese Visualisierung wird als iterativer Prozess mit der nachfolgenden Bestimmung der technischen Ausprägung erstellt. Im ersten Schritt können die zu Verfügung stehenden Zeiten bspw. durch Methoden wie MTM für Mensch und automatisiertes System abgeschätzt werden. Ansätze hierzu wurden in Kapitel 3.1.1 vorgestellt (Vgl. Kapitel 3.1.1, [DEU14; SCH16b]). Basierend auf der später bestimmten technischen Lösung kann eine Validierung und Optimierung der Prozessaufteilung erfolgen.

Ableitung relevanter technischer Parameter

Zur technischen Lösungsfindung und der Bestimmung geeigneter Modulausprägungen müssen geeignete technische Parameter bestimmt werden. Genutzt werden hierzu die Ergebnisse der (Teil-)Produktanalyse und des Systementwurfes. Zusätzlich können aus der Arbeitsraumaufteilung und Gesamtprozessbeschreibung zu erfüllende Parameter abgeleitet werden. Die Parameter unterscheiden sich je nach Prozess und Verantwortlichkeiten, welche dem automatisierten System zugeordnet werden. Grundsätzlich wichtig sind die folgenden Parameter:

- Größe des benötigten Arbeitsraumes, daraus berechnet die nötige Reichweite des Systems.
- Gewicht und Größe der zu bewegenden Montageobjekte.
- Material und Oberflächenbeschaffenheit der Montageobjekte.
- Zu erreichende Genauigkeiten bei der Positionierung der Montageobjekte.
- Einzuhaltende Prozesszeiten.

5.5 Zusammenfassung

Zu Beginn dieses Kapitels wurde das durchgängige Vorgehensmodell vorgestellt. Im Folgenden wurden die Methoden zur Durchführung des I. und II. Schrittes des Modells beschrieben. In Schritt I. wurde gezeigt, wie eine Analyse und Anforderungsdefinition durchgeführt wird und die prozessrelevanten Hauptmerkmale bestimmt werden. In

Schritt II wurden die bestimmten Merkmale genutzt, um Verantwortlichkeiten des zugehörigen Montageprozesses abzuleiten und diese lösungsneutral darzustellen. Als nächster Teilschritt erfolgte die Prozessplanung. Zuerst wurden die zu erfüllenden Verantwortlichkeiten in einer Operationsreihenfolge dargestellt, um eine Prozessabfolge bestimmen zu können. Anschließend erfolgte eine Zuweisung der Verantwortlichkeiten zu Mensch oder automatisiertem System durch eine Bewertung anhand der Parameter Kognitions Level, Variantenabhängigkeit, Qualitäts-/Sicherheitsrelevanz und Ergonomie. Mit den zugeordneten Verantwortlichkeiten wurde eine Aufteilung des Arbeitsraumes vorgenommen. Die generierten Informationen wurden anschließend in der Gesamtprozessbeschreibung zusammengefasst und ein detaillierter zeitlicher Arbeitsablauf für Mensch und automatisiertes System vorgenommen.

Im nun folgenden Kapitel wird beschrieben wie aus dieser Gesamtprozessbeschreibung eine ablaufbasierte Arbeitsanweisung für das automatisierte System abgeleitet wird und wie diese aufgebaut ist. Im Anschluss erfolgen die Beschreibung des Modularisierungskonzeptes und die Vorgehensweise zur Modulauswahl. Danach werden in den Schritten III. und IV. der Methodik beschrieben, wie die technische Realisierung und die Integration durchgeführt werden.

6 Konzept modularer Konfiguration und Integration

6.1 Ablauf der Konfiguration und Integration

Um ausgehend vom Systementwurf effizient den Prozessablauf umsetzen und zugehörige technische Lösungen bestimmen zu können, wurde ein Konfigurations- und Integrationskonzept entwickelt. Das detaillierte Vorgehen ist in Abbildung 6.1 dargestellt.

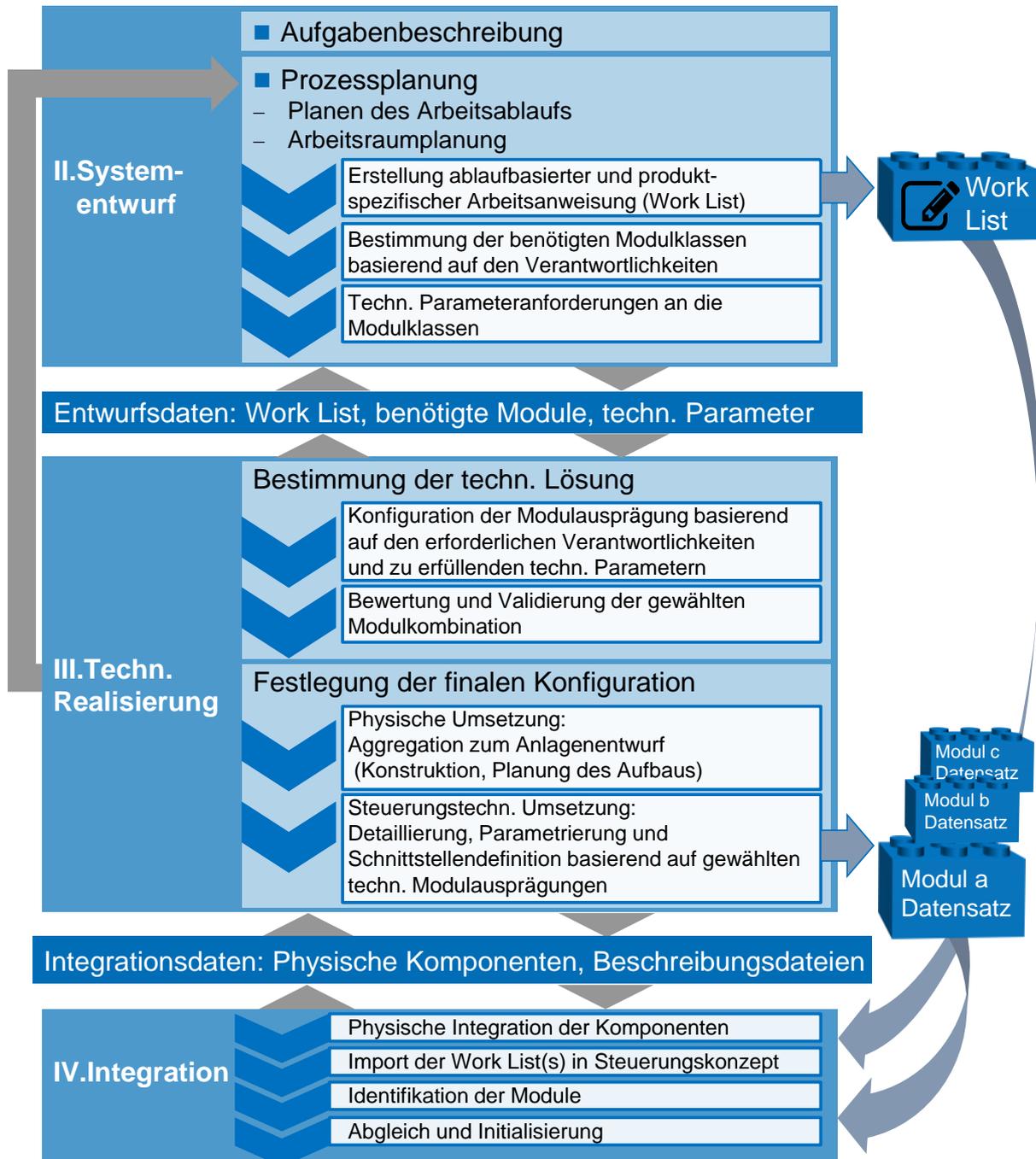


Abbildung 6.1: Ablauf des Konfigurations- und Integrationsprozesses

Innerhalb des Systementwurfs wird zunächst ausgehend von den Ergebnissen der Teilschritte Prozessplanung, Arbeitsablaufplanung und Arbeitsraumplanung, welche in Kapitel 5 dargestellt sind, eine Arbeitsanweisung für das automatisierte System in

Form einer Work List abgeleitet. Diese Liste wird für jede durchzuführende Variante des Prozessablaufs erstellt und in einer für die Anlagensteuerung lesbaren Form als Datensatz gespeichert. Der genaue Aufbau der Work List wird in Kapitel 6.2 beschrieben. Die einzelnen Schritte der Work List entsprechen den durchzuführenden Aufgaben der Prozessstation und enthalten die benötigten Verantwortlichkeiten, welche erfüllt werden müssen. Diese Verantwortlichkeiten werden nach ihrer Art (bspw. Bewegungsbefehle) als sogenannte Leistungsfähigkeiten (Capabilities) gruppiert. Die einzelnen Modulklassen des Modulbaukastens bieten diese Leistungsfähigkeiten an. Capabilities entsprechen also den Fähigkeiten der Module, welche im späteren Prozess durch den Aufruf der verfügbaren Methoden des Moduls erbracht werden können. Das Modularisierungskonzept wird in Kapitel 6.3 im Detail erklärt.

Zusätzlich zur Verantwortlichkeit werden die technischen Parameteranforderungen an die Module beschrieben. Diese ergeben sich aus der Prozess- und Arbeitsraumplanung und sind beispielsweise benötigte Reichweite eines Roboters oder die Traglast.

Im Folgenden werden aus den einzelnen Modulklassen die passenden Modulausprägungen ausgewählt. Diese Ausprägung entspricht den verwendeten Betriebsmitteln, bspw. UR 10 Roboter. Die gewählten Komponenten werden dann in der Kombination bewertet und eine finale Konfiguration wird ausgewählt.

Mit der erfolgten Auswahl kann eine physische Umsetzung des Anlagenentwurfs als Konstruktion durchgeführt werden. Als steuerungstechnische Komponente wird nach einer Parametrierung der Modulausprägungen jeweils ein Datensatz erzeugt, welcher später in die Steuerung übertragen wird. Dieses Vorgehen wird in Kapitel 6.4 beschrieben.

Die ausgewählten technischen Lösungen werden dann als physische Komponenten in die Anlage integriert und erhalten eine gleichsinnige cyber-Komponente in einem Steuerungskonzept. Die steuerungstechnische Umsetzung der cyber-Komponente erfolgt durch die Übertragung der Datensätze auf die Steuerung. Die Work List wird geladen und eine Identifikation der vorhandenen Module durchgeführt. Abschließend erfolgt ein Abgleich zwischen den geforderten Verantwortlichkeiten der Work List und den vorhandenen Capabilities der Module. Sind alle benötigten Verantwortlichkeiten verfügbar, kann der Prozess ausgeführt werden. Hierdurch wird eine flexible Rekonfiguration der Anlage ermöglicht, da beim Austausch einer Komponente ein einfacher Tausch des physischen Teils in der Anlage und des zugehörigen Datensatzes in der Steuerung erfolgt. Ebenso flexibel erfolgt der Austausch einer Work List bei Änderung der Aufgabenfolge oder bei variantenspezifischen Prozessen. Der Ablauf der Integration wird in Kapitel 6.5 detailliert beschrieben

Die Komposition von Diensten in einer Work List und die Konfiguration von Modulen zur Erfüllung der geforderten Verantwortlichkeit werden in einer Konfigurationssoftware umgesetzt. Die Integration dieser Konfigurationen erfolgt in ein standardisiertes Steuerungskonzept als modulare Bausteine. Durch diese Vorgehensweise wird eine

konsistente Durchgängigkeit der Methodik erreicht und eine einheitliche Datenbasis erzeugt. Die Realisierung dieser Systemelemente wird in Kapitel 6.6 beschrieben

6.2 Aufbau und Inhalt der Work List

Die Aufgabe der Work List ist die Erfüllung der Gesamtverantwortlichkeit der Prozessschritte, welche dem automatisierten System zugeordnet wurden (Vgl. Kapitel 5.3.2). Die einzelnen durchzuführenden Aufgaben in der Work List werden als Jobs bezeichnet und bilden die entsprechenden Unterverantwortlichkeiten ab. Die Beschreibung erfolgt derart, dass eine Integration in das Steuerungssystem der Prozessstation erfolgen kann. Unterschiedliche Vorgänge, beispielsweise bei verschiedenen Fahrzeugvarianten, werden durch verschiedene Work Lists abgebildet. Die Work List stellt somit eine Sequenzierung bzw. eine Komposition der verschiedenen Dienste dar, die während des Prozesses durchgeführt werden müssen. Verzweigungen, Schleifen und Sprünge sind über die Anpassung von Job Eigenschaften möglich. Dies wird über das Setzen des Status nach Bearbeitung eines Jobs und einer Statusauswertung durch das Steuerungskonzept durchgeführt. Eine Parallelisierung von Diensten kann über eine Variable in den Job-Eigenschaften vorgenommen werden. Hier wird angegeben, ob der Job parallel zum nächst folgenden Job ausgeführt werden soll.

Bei der Erstellung der Work List kann auf folgende Komponenten zurückgegriffen werden:

- **Jobs:** Die Basiskomponente der Work List sind einzelne Jobs. Diese entsprechen den durchzuführenden Tätigkeiten zur Erfüllung einer Unterverantwortlichkeit unter Verwendung einer einzelnen Modulausprägung. Beispiel wäre der Befehl Move PTP, welcher unter Nutzung eines Handhabungsgerätes eine Point to Point Bewegung ausführt.
- **System Jobs:** Im Gegensatz zu einem Job bilden System Jobs die Erfüllung einer Unterverantwortlichkeit unter Verwendung mehrerer Module ab. Somit können komplexe Abläufe einfach realisiert werden. Ein Beispiel ist der System Job Move-ToHeight, wobei ein Abstandssensor in Kombination mit der Roboterbewegung genutzt wird, um eine bestimmte Höhe anzufahren.
- **Sub List:** Um eine Sequenz von Diensten, welche nacheinander ablaufen, wiederverwenden zu können, ist die Möglichkeit gegeben Work Lists als Sub Listen in einer anderen Work List zu verwenden. Bspw. kann ein Schraubprozess, welcher an verschiedenen Positionen in gleicher Art und Weise durchgeführt wird, als Sub Liste mehrfach eingebunden werden.

Jobs, System Jobs und Sub Lists erfüllen wie zuvor beschrieben innerhalb des Arbeitsablaufs eine Unterverantwortlichkeit. Als Vereinfachung werden bei folgenden allgemeinen Beschreibungen Jobs und System Jobs als Jobs bezeichnet. Beide verfügen über zwei Eigenschaften zur Sicherung der Durchgängigkeit und der Möglichkeit der Zuordnung von Modulen zur Erfüllung der Unterverantwortlichkeit:

- Leistungsfähigkeit (Capability): Die Capability beschreibt welche Leistungsfähigkeit zur Erfüllung der geforderten Unterverantwortlichkeit erbracht werden muss („Was muss gemacht werden?“). Dies entspricht einer Fähigkeitskategorie (bspw. „move“).
- Dienst (Method): Method bildet einen konkreten Dienst ab, welcher die Ausführung zur Erfüllung der Verantwortlichkeit beschreibt. („Wie wird es gemacht?“). Dies entspricht einer Ausführungsart (bspw. „movePTP“)

Die zur Erstellung der Work List benötigten Jobs und System Jobs sind in einer Datenbank gespeichert und entsprechen den Leistungsfähigkeiten und Methoden der vorhandenen Modulausprägungen. Dies ermöglicht die Wiederverwendung häufig genutzter Modulausprägungen. Werden bisher nicht vorhandene Leistungsfähigkeiten oder Dienste benötigt, so können Betriebsmittel, welche diese Leistungsfähigkeit haben und Dienste erbringen zur Datenbank hinzugefügt werden. Das Vorgehen hierzu wird in Kap 6.6.4 beschrieben. Häufig können Dienste von unterschiedlichen Modulausprägungen erfüllt werden. Um einen Systementwurf zunächst lösungsneutral erstellen zu können, wird daher in einem ersten Schritt nur festgelegt, welche Modulklassen (bspw. Robot System) benötigt werden. Die Work List legt, wie zuvor beschrieben, über die enthaltenen Jobs die benötigten Unterverantwortlichkeiten der Anlage fest. Diesen Verantwortlichkeiten werden dann Modulklassen zugeordnet, welche eine entsprechende Leistungsfähigkeit (Capability) haben. Wenn beispielsweise ein Teil innerhalb der Work List von Punkt A nach Punkt B bewegt werden soll, bedeutet dies, dass die Capability „move“ innerhalb der Anlage zur Verfügung stehen muss.

Hiermit wird es möglich bei der Anlagenplanung die notwendigen Module zu bestimmen und einen durchgängigen Planungsprozess zu erhalten. Ebenso kann bei Änderung einer Work List beispielsweise durch neue Varianten die Produzierbarkeit in der bestehenden Anlage überprüft werden. Im Anschluss wird dann auf Grundlage der benötigten technischen Parameter eine Auswahl der genauen Modulausprägung und damit der technischen Lösung getroffen. Die erhaltene Gesamtkonfiguration wird bewertet und mit alternativen Lösungen verglichen. Das Ergebnis ist eine finale Konfiguration, welche im Anschluss integriert wird.

Die praktische Realisierung einer Benutzerschnittstelle, welche genutzt wird, um Work Lists zu erstellen und diese in einem Inbetriebnahmemodus an einer Anlage zu testen und anpassen zu können, wird in Kapitel 6.6.2 beschrieben. Der Ablauf der Zusammenstellung einer Work List ist an dieser Stelle ebenso gezeigt.

6.3 Definition des Modularisierungskonzeptes

Das Modularisierungskonzept wurde entwickelt, um ausgehend von der erstellten Work List eine Zuordnung zwischen den durchzuführenden Aufgaben mit ihren geforderten Verantwortlichkeiten und den benötigten Modulen zur Verantwortlichkeitserfüllung zu schaffen. Im ersten Schritt erfolgt eine lösungsneutrale Zuordnung der Capa-

bilities zu den Modulklassen, aus welchen dann im weiteren Verlauf geeignete Modulausprägungen ausgewählt werden. Diese Modulausprägungen entsprechen dann den technischen Lösungen.

Innerhalb dieses Kapitels wird zunächst die Beschreibungssystematik der Module erklärt und im Anschluss der Aufbau und die Bestandteile des Modulbaukastens.

6.3.1 Beschreibungssystematik der Module

Die Beschreibungssystematik der Module lässt sich in zwei Bereiche unterteilen:

- Notwendige Daten und Informationen zur Modulkonfiguration: Um die Modulklassen und anschließend die Modulausprägung konfigurieren zu können, werden Informationen benötigt die aufzeigen, welche Fähigkeiten das Modul hat und welche technischen Parameter erfüllt werden können.
- Notwendige Daten und Informationen zur Modulintegration: Um die Module in die Anlagensteuerung integrieren zu können sind Informationen über die ausführbaren Methoden sowie Beschreibungsattribute notwendig, um die Module ansteuern zu können.

Die gewählte Beschreibungssystematik ist in Abbildung 6.2 dargestellt.

Module:
– capability
– planAttribute1
– planAttribute2
– controlAttribute1
– controlAttribute2
– method 1()
– method 2()

Abbildung 6.2: Beschreibungssystematik der Module

Jedes Modul verfügt über eine Capability, welche die Leistungsfähigkeit beschreibt, die erbracht werden kann und eine Zuordnung zu einer Modulkasse ermöglicht. Die Capability kann als eine Clusterung von Jobs bzw. erforderlicher Methoden der Modulausprägung verstanden werden, welche durch eine Modulkasse erfüllt werden können. Bspw. gehört der Job „movePTP“ zur Capability „move“, bezeichnet also die Fähigkeit etwas zu bewegen und stellt somit eine Instanz der Modulkasse Robot Systems dar (Vgl. Kapitel 6.3.2).

Des Weiteren verfügen Module über Attribute, welche zur Planung und Konfiguration der Modulausprägung genutzt werden. Diese werden planAttribute genannt. Beispielsweise wird bei einem Roboter der Arbeitsbereich oder dessen Nennlast angegeben.

Weitere vorhandene Attribute sind controlAttributes, welche bei der Implementierung und der Prozessausführung gebraucht werden. Z.B. Informationen für die Kommunikation, wie eine IP-Adresse.

Zur Durchführung der geforderten Dienste aus der Work List verfügen die Module über Methoden, welche zur Dienstauführung aufgerufen werden. Bspw. ein Bewegungsbefehl eines Roboters.

Beschreibung der Module innerhalb der Datenbank

Zur Zusammenstellung der Work List und Konfiguration der Modulklassen und -ausprägung müssen die einzelnen Module und deren Ausprägungen mit einer einheitlichen Beschreibungssystematik in einer Datenbank gespeichert werden. Zum Einfügen einer Modulklassen mit zugehöriger Capability in die Datenbank werden zunächst die planAttributes festgelegt. Diese Attribute sind unabhängig von der Modulausprägung für jede Klasse so festzulegen, dass eine Unterscheidung und Filterung im Konfigurationsprozess erfolgen kann und eine passende Auswahl ermöglicht wird. Als Beispiel ist in Abbildung 6.3 die Klasse Robot Systems in vereinfachter Form mit ihren planAttributes und methods angegeben.

Module: Robot System
name: UR10 capability = move description = HRC-Robot type = Robot maxSpeed = 1200 maxAcceleration = 1000 maxReach = 1300 Payload=10 ...
- getActualPos (): pose - DriveTargetPose(targetPos,driveMode,lin/circ/ptp):bool ...

Abbildung 6.3: Modulklass Robot System

In diesem Fall sind wichtige Parameter zur Auswahl des Roboters wie z.B. die maximale Reichweite oder Nennlast angegeben. In der Beschreibung ist die Angabe hinterlegt, dass dieser Roboter unter geeigneten sicherheitstechnischen Rahmenbedingungen in Mensch-Roboter Kooperation eingesetzt werden kann. Die ausführbaren Methoden sind u.a. die Ausgabe der aktuellen Position und das Ausführen eines Fahrbefehls zu einer Position unter Angabe der Bewegungsart.

Die Beschreibungsattribute können in der Datenbank angepasst oder zusätzliche Attribute bei Bedarf angelegt werden. Die praktische Umsetzung wird in Kapitel 6.6.4 detailliert beschrieben.

Die controlAttributes, welche zur Ausführung der Dienste auf der Steuerung benötigt werden, sind hier weggelassen und in Kapitel 6.5 und 6.6 näher beschrieben

Nach der Beschreibung des Aufbaus der einzelnen Module erfolgt nun die Gruppierung in einem Modulbaukasten.

6.3.2 Aufbau und Bestandteile des modularen Baukastens

Die Gruppierung der Module erfolgt anhand ähnlicher Fähigkeiten in neun Modulklassen. Diese Klassen fassen lösungsneutral alle möglichen Modulausprägungen zusammen. Entsprechend der benötigten Anwendung kann eine geeignete Modulausprägung ausgewählt werden.

Die Modulstruktur wurde in Anlehnung an die im Kapitel 2.3.2 vorgestellte Struktur der RollClassLibrary in AutomationML gewählt. Die verwendeten Modulklassen sind in Abbildung 6.4 dargestellt.

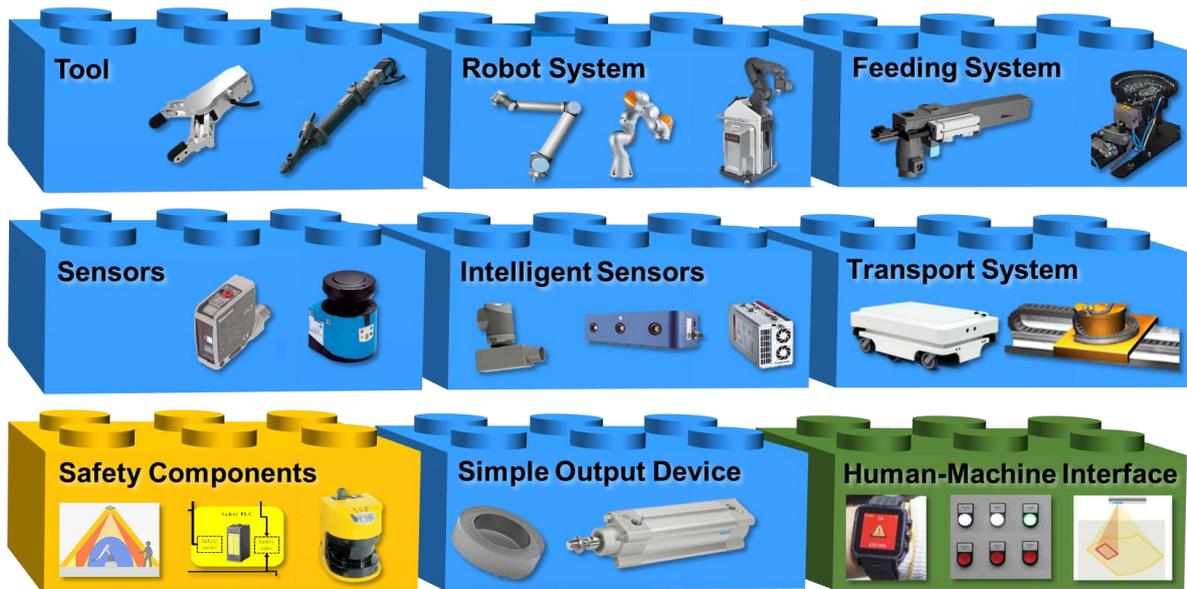


Abbildung 6.4: Bestandteile des modularen Baukastens

Die Modulklassen lassen sich wie folgt beschreiben:

- **Werkzeuge:** In dieser Modulkategorie sind alle Werkzeuge zusammengefasst, die genutzt werden, um Montageoperationen auszuführen. Bspw. Schrauber oder Greifer.
- **Roboter Systeme:** Diese Klasse umfasst alle Handhabungsgeräte im speziellen Roboter. Sie werden genutzt, um den Endeffektor im Arbeitsraum zu positionieren.
- **Zuführsystem:** Diese Klasse beschreibt Zuführsysteme, welche Teile für den Montageprozess bereitstellen, bspw. Vibrationswendelförderer. Eine manuelle Teileweitergabe an das automatisierte System kann ebenso möglich sein.
- **Sensoren:** In dieser Klasse befinden sich alle Sensoren, welche direkt an das Steuerungssystem Werte liefern. Bspw. liefert ein angeschlossener Lasertriangulations-sensor einen Stromwert, welcher innerhalb der Steuerung weiterverarbeitet wird.
- **Intelligente Sensoren:** Diese Klasse umfasst Sensoren, welche eine interne Datenverarbeitung besitzen und an das Steuerungssystem einen Wert in einer SI-Einheit liefern. Bspw. verarbeitet eine angeschlossene Kamera mit nachfolgendem Bildverarbeitungsalgorithmus ein aufgenommenes Bild, führt Messungen im Bild durch und liefert dem Steuerungssystem einen Abstandswert.

- **Transportsystem:** In dieser Klasse werden alle Systeme zusammengefasst, mittels derer das Handhabungsgerät in einem erweiterten Arbeitsraum positioniert werden kann. Dies ist beispielsweise nötig, um die Reichweite des Handhabungsgerätes zu vergrößern („7.-Achse“) oder eine Synchronisation mit einem Montageobjekt im Fließbetrieb herzustellen.
- **Simple Output Device:** Simple Output Devices sind Betriebsmittel, welche über eine einfache (digitale) Schnittstelle aktiviert und deaktiviert werden. Bspw. ein Pneumatikzylinder oder eine Kamerabeleuchtung.
- **Sicherheitskomponenten:** Wie in Kapitel 5.4.2 beschrieben, können je nach Arbeitsraumplanung und Sicherheitsbewertung Maßnahmen zur Absicherung des Arbeitsraums notwendig sein. Die hierzu benötigten Komponenten sind in dieser Klasse enthalten. Beispiele sind Lichtschranken oder Laserscanner.
- **Mensch-Maschine Schnittstelle:** Alle Systemelemente, welche zur Kommunikation und Interaktion des Mitarbeiters mit dem automatisierten System genutzt werden können sind in dieser Klasse zusammengefasst. Es können simple Knöpfe die betätigt werden aber auch Smart-Devices wie Smart Watches/ Tablets sowie Projektionssysteme verwendet werden.

Alle Modulusprägungen müssen bei erstmaliger Benutzung in einer Datenbank angelegt und die entsprechenden Informationen zur automatischen Bausteingenerierung hinterlegt werden. Das Vorgehen hierzu wird in Kapitel 6.6.4 detailliert beschrieben.

6.4 Konfiguration der Module

Innerhalb dieses Kapitels wird die Vorgehensweise zur Konfiguration der Modulusprägungen basierend auf einer Work List beschrieben. Hierzu wird zunächst der Gesamtprozess dargestellt. Danach werden die Vorgehensweise zur Bestimmung einer Modulusprägung und die Zuordnung einer technischen Lösung gezeigt. Es folgt die Festlegung der finalen Konfiguration und das Vorgehen zu physischen und steuerungstechnischen Umsetzung.

6.4.1 Ablauf des Konfigurationsprozesses

In Abbildung 6.5 wird der Ablauf des Konfigurationsprozesses dargestellt.

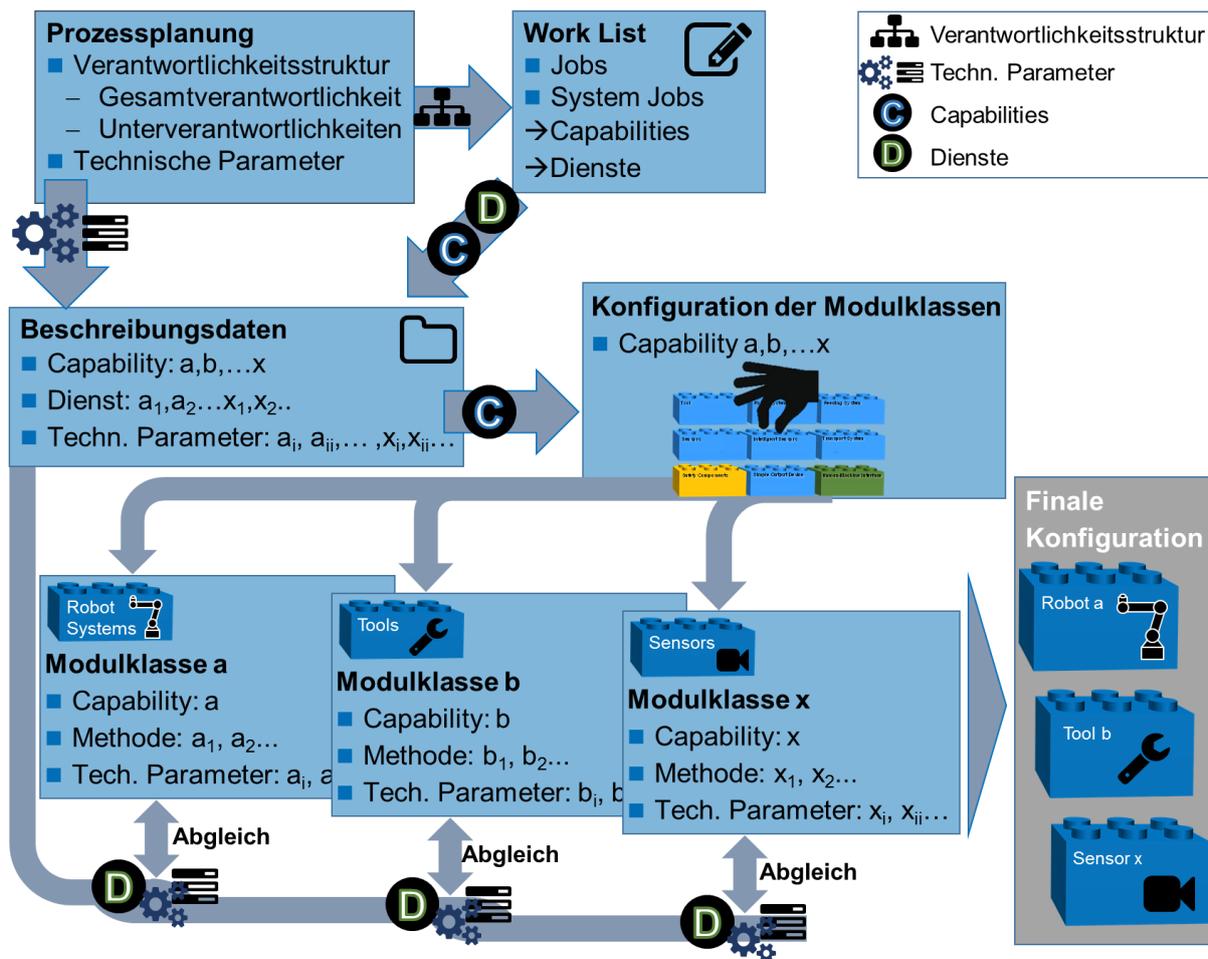


Abbildung 6.5: Ablauf des Konfigurationsprozesses

Aus den zuvor durchgeführten Schritten der Prozessplanung wird zur Erstellung der Work List die Verantwortlichkeitsstruktur benötigt. Um eine Auswahl der Modulausprägung durchzuführen werden die technischen Parameter genutzt. Wie in Kapitel 6.1 innerhalb der Erstellung der Work List beschrieben, ergeben sich aus den einzelnen Jobs, bzw. System Jobs der Work List die benötigten Capabilities und Dienste zur Erfüllung der Unterverantwortlichkeit. Innerhalb der Konfiguration werden die Capabilities im ersten Schritt genutzt, um die benötigten Modulklassen auszuwählen. Anschließend erfolgt innerhalb der Modulklassen durch einen Abgleich mit den benötigten Diensten und technischen Parametern die Auswahl der spezifischen Modulausprägung. Diese wird dann zur Gesamtkonfiguration hinzugefügt. Nach einer Bewertung der Gesamtkonfiguration wird die ausgewählte Lösung finalisiert und umgesetzt.

6.4.2 Vorgehensweise zur Bestimmung der Modulausprägung

Die Vorgehensweise zur Bestimmung der Modulausprägung nutzt Prinzipien der Ontologie. Der Begriff wird hier im Sinne der Ingenieurwissenschaften als eine Konzeptionsmöglichkeit genutzt, welche auf semantische Strukturen zurückgreift, um implizite Bedingungen abzubilden (Vgl. [GRU93; GUA95; OST04, S. 39]). Ziel ist es die Informationen der Anlagenplanung und die Beschreibung der Betriebsmittel systematisch

und maschinenverständlich auszudrücken. Dies ermöglicht einen strukturierten Datenaustausch, -bearbeitung und Wiederverwendung (Vgl. [MER10]). Ebenso ergibt sich die Möglichkeit einer Selbstidentifikation der Anlage.

Innerhalb der Methodik bildet die Beschreibungssystematik der Module und der zugehörige Aufbau der Work List die Grundlage zur durchgängigen semantischen Verknüpfung der Planungsinformationen mit dem Prozessablauf und den zugehörigen Betriebsmitteln. Der durchgängige Informationsfluss wurde zuvor in Abbildung 6.5 gezeigt und beschrieben. Im Zuge der Konfiguration werden die Informationen aus der Work List mit der Beschreibung der Module verknüpft. Hierzu wird im Folgenden die Auswahl der Modulusprägung basierend auf der in Kapitel 6.3.1 dargestellten Beschreibung der Module innerhalb der Datenbank gezeigt.

Auswahl der Modulusprägung und technischen Lösung

Wie zuvor in Abbildung 6.5 gezeigt erfolgt als Vorstufe zur Modulusprägung eine Auswahl der benötigten Modulklassen aufgrund der benötigten Capabilities.

Die spätere Auswahl der Modulusprägung und somit der technischen Lösung erfolgt durch einen Abgleich der innerhalb der Planung definierten technischen Parameter und den benötigten Diensten mit den Beschreibungsattributen (planAttributes) sowie den Methoden (methods) der vorhandenen Modulusprägungen. In Abbildung 6.6 ist der Ablauf der Auswahl an einem Beispiel dargestellt.

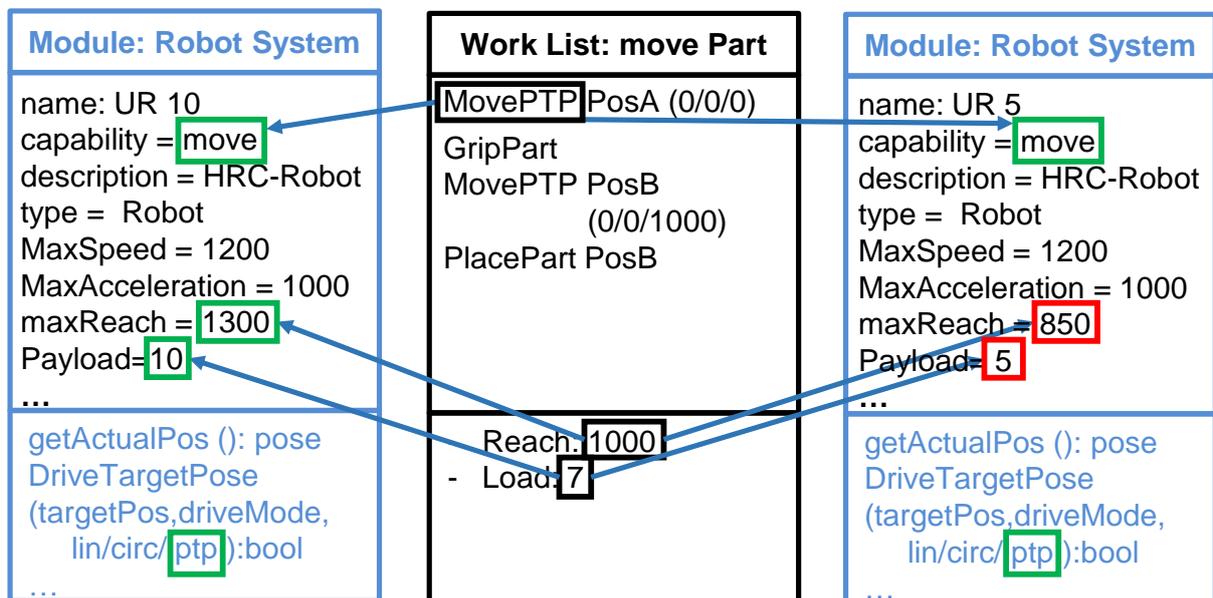


Abbildung 6.6: Auswahl der Modulusprägung

In diesem Beispiel ist eine einfache Work List zur Bewegung eines Bauteils angegeben. Beide Roboter verfügen über die benötigte Capability „move“ und die Methode zur Ausführung des Dienstes Move PTP. Beim Abgleich der technischen Parameter zeigt sich jedoch, dass nur die Modulusprägung UR10 in diesem Fall geeignet ist.

Diese Auswahl wird durch den Montageplaner vorgenommen und durch eine Softwareumgebung unterstützt. Die genaue Ausführung der Konfigurationssoftware wird in Kapitel 6.6.2 beschrieben.

Mithilfe dieser Vorgehensweise lassen sich die Modulausprägungen sehr simpel konfigurieren und ein genauer Abgleich zwischen den benötigten Fähigkeiten und den Fähigkeiten der Betriebsmittel ist möglich. Innerhalb der in Kapitel 6.6.2 gezeigten Software findet ein automatisierter Abgleich zwischen benötigten Verantwortlichkeiten der Work List und den bereits konfigurierten Modulausprägungen statt. Somit ist sichergestellt, dass alle benötigten Fähigkeiten vorhanden sind und die notwendigen Dienste der Work List ausgeführt werden können. Ebenso wird ein Overengineering durch Hinzufügen nicht benötigter Komponenten vermieden. Beim Austausch einzelner Jobs in der Work List, bspw. beim Aufkommen neuer Varianten, kann ebenfalls sehr einfach ein Abgleich der bestehenden Konfiguration mit dem geforderten Umfang durchgeführt werden. Somit wird die Produzierbarkeit neuer Varianten sichergestellt.

6.4.3 Festlegung der finalen Konfiguration

Nach erfolgter Konfiguration aller benötigten Modulausprägungen kann eine Zusammenstellung und Bewertung als Gesamtsystem vorgenommen und eine finale Konfiguration festgelegt werden. Innerhalb des Konfigurationsprozesses werden durch die Software (Vgl. Kapitel 6.6.2) passende Lösungsmöglichkeiten vorgeschlagen und eine Filterung nach festgelegten Kriterien kann durchgeführt werden. Dies ermöglicht eine schnelle Konfiguration mehrerer Lösungsalternativen, welche verglichen und bewertet werden können.

Die Bewertung der Lösungsalternativen erfolgt durch verschiedene Kriterien:

- Bewertung des Prozessablaufs: Das Gesamtsystem wird durch eine Simulation analysiert. Es wird geprüft ob der zuvor geplante Prozessablauf und die Arbeitsraumplanung durch die gewählten Modulausprägungen im Zusammenwirken abgedeckt werden können.
- Wirtschaftliche Betrachtung: Die Konfigurationen werden anhand der entstehenden Kosten verglichen.
- Vorhandene Erfahrung: Ist das Betriebsmittel bereits eingesetzt worden und sind Erfahrungen im Unternehmen vorhanden (Inbetriebnehmer, Instandhaltung etc.)
- Abdeckung der Varianz: Absicherung ob alle vorhandenen und vorhersehbar geplanten Varianten des Produktes durch diese Konfiguration produziert werden können.

Nach erfolgter Bewertung wird die geeignete Lösungsvariante und damit die Systemkonfiguration festgelegt und detailliert. Hier erfolgt wie bereits zuvor in Kapitel 6.1 beschrieben eine Aufteilung in einen physischen und einen steuerungstechnischen (cyber) Teil der Modulausprägungen. Innerhalb dieser beiden Teile müssen Maßnahmen zur Vorbereitung der Integration getroffen werden:

- **Physischer Anteil:** Die gewählten Modulausprägungen werden in einer Konstruktion zu einem Anlagenentwurf zusammengefügt und der praktische Aufbau der Station wird geplant. Der modulare Aufbau soll möglichst vollständig auch im physischen Aufbau umgesetzt werden. Die Komponenten sollen also so integriert werden, dass ein problemloser Austausch und eine Rekonfiguration stattfinden kann. Die praktische Ausführung als modularer Montageassistent ist in Kapitel 7.4.1 und 7.5.1 beschrieben.
- **Steuerungstechnischer Anteil:** Zur späteren Integration müssen die einzelnen Module parametrisiert werden und die Schnittstellen zum Steuerungssystem beschrieben werden. Hierzu gehört beispielsweise die Angabe von Parametern zur Kommunikation (IP-Adressen, Port Nummern etc.).

Die Durchführung dieser Schritte wird innerhalb der Validierung in Kapitel 7 anhand eines Umsetzungsbeispiels beschrieben.

Nach Abschluss dieser Teilschritte liegt eine finale Konfiguration mit technischen Lösungen für die Modulausprägungen vor, welche durch eine konstruktive Umsetzung und Parametrierung zur Integration vorbereitet ist.

6.5 Integration der Module

Innerhalb dieses Kapitels wird zunächst der Ablauf des Integrationsprozesses erläutert. Im Anschluss erfolgen eine Beschreibung der Struktur der Anlagensteuerung und die Abbildung der Anlagentopologie.

6.5.1 Ablauf des Integrationsprozesses

Analog zur Beschreibung der Modulausprägungen in Kapitel 6.4 wird bei der Integration der Module unterschieden zwischen der physischen und der steuerungstechnischen Integration.

Physische Integration

Dieser Bereich umfasst den physischen Anlagenaufbau in der Produktion. Der zuvor konstruktiv umgesetzte und simulativ getestete Anlagenentwurf wird nun durch den Aufbau der Komponenten praktisch umgesetzt. Das modulare Grundprinzip wird hier, wie bereits bei der Konstruktion beschrieben, möglichst vollständig berücksichtigt. Die Realisierung erfolgt dadurch, dass einzelne Module einfach ausgetauscht werden können. Hierzu sind gut zugängliche und leicht zu lösende Verbindungen zu wählen und die Möglichkeit eines schnellen Trennens und Wiederherstellens der Medienversorgung. Als Grundaufbau wird eine standardisierte Basis oder Transportsystem verwendet, wo die übrigen Systembestandteile einfach angebracht und auch wieder demontriert werden können.

Eine schnelle Rekonfiguration der Anlage wird dadurch erleichtert, ebenso wie die Wartbarkeit. Die praktische Ausführung ist in Kapitel 7.4.1 und 7.5.1 gezeigt.

Steuerungstechnische Integration

Innerhalb des in dieser Arbeit beschriebenen Konzeptes erfolgt eine Übertragung der Modulbausteine in eine, typischerweise in der Industrie verwendete, Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). Dies ist bewusst so gewollt, da eine Umsetzbarkeit der Methodik auf bestehenden Systemen und standardmäßig verwandter Hardware möglich sein soll. Ebenso soll eine Erfüllung der Anforderungen hinsichtlich Aufbau und Sicherheit von Anlagen seitens der Automobilindustrie gewährleistet sein.

Die steuerungstechnische Integration wird zum einen durch die Übertragung der Work List(-en) in das Steuerungssystem und zum anderen durch Übertragung der Datensätze der Module durchgeführt. Dieser Vorgang wird wie in Kapitel 6.6.2 dargestellt softwaretechnisch unterstützt, indem im Anschluss an die abgeschlossene Konfiguration die Datensätze zur Steuerungsintegration automatisiert ausgegeben werden. Mithilfe der in Abschnitt 6.3.1 vorgestellten Beschreibungssystematik der Module werden die benötigten Attribute (controlAttributes) zur Integration parametrisiert. Beispielsweise werden die Portnummern und IP-Adressen zur Ansteuerung oder die belegten Ein- und Ausgänge an der Steuerung beschrieben. Mithilfe dieser Informationen können die Datensätze in der Steuerung automatisiert geladen und initialisiert werden. Es erfolgt eine Selbstidentifikation der vorhandenen Module in der Steuerung und ein Abgleich mit den geforderten Verantwortlichkeiten der geladenen Work Lists. Ist dieser Abgleich erfolgreich durchgeführt worden, kann der Produktionsprozess gestartet werden. Durch diese Vorgehensweise ist sichergestellt, dass alle benötigten Module vorhanden sind und durch die Steuerung erkannt wurden. Die Umsetzung des Steuerungskonzeptes ist detailliert in Kapitel 6.6.3 beschrieben.

Um eine durchgängig gleiche Entsprechung der realen und steuerungstechnischen Modulusprägung zu erhalten, wird die Anlagentopologie der physisch verwendeten Komponenten in der Steuerung repräsentiert.

6.5.2 Steuerungstechnische Abbildung der Anlagentopologie

Die steuerungstechnische Abbildung der Anlagentopologie erfolgt ebenso wie die zuvor beschriebene Modulstruktur in Anlehnung an die Struktur der RollClassLibrary in AutomationML (Vgl. Kapitel 2.3.2). Innerhalb dieser Arbeit wird das Steuerungskonzept für die Steuerung einer Montageanlage (Subsystem 3. Ordnung) genutzt und in einer gängigen speicherprogrammierbaren Industriesteuerung abgebildet. Die Struktur ist in Abbildung 6.7 dargestellt.

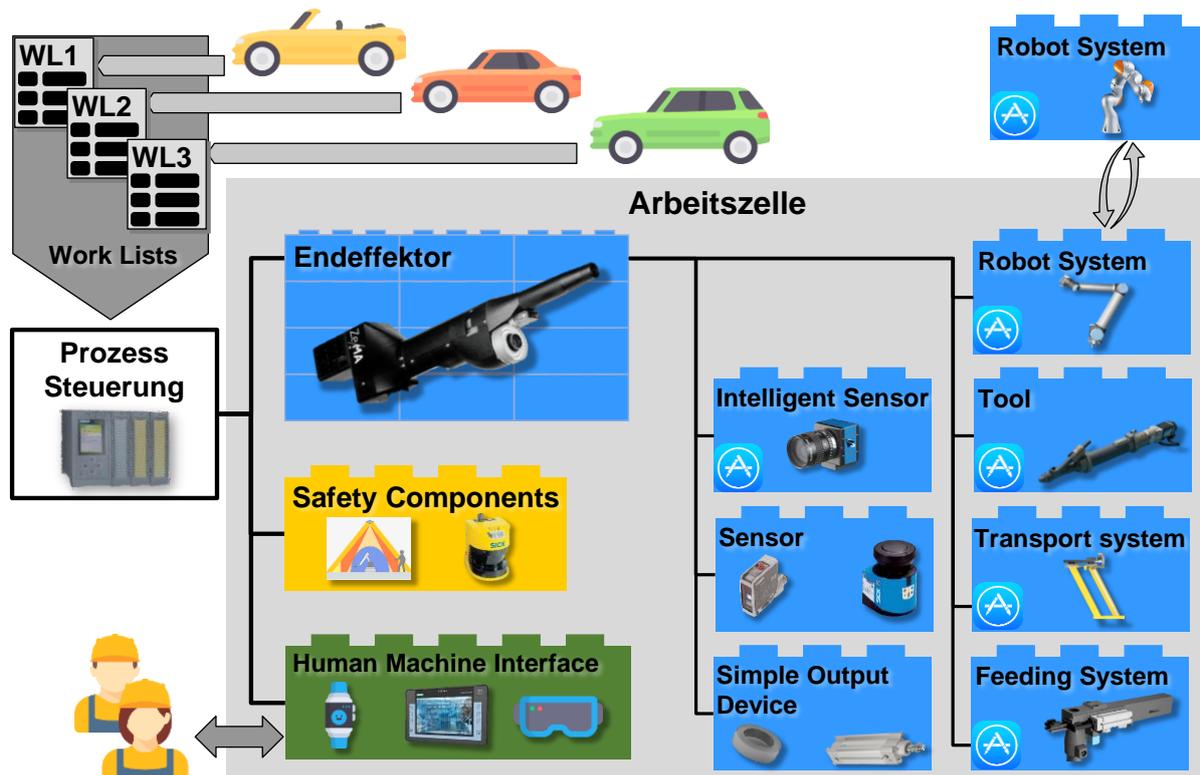


Abbildung 6.7: Struktur der Anlagentopologie innerhalb der Steuerung

Die Anlagentopologie ist in der Steuerung als Arbeitszelle mit einem oder mehreren Endeffektoren, den Sicherheitskomponenten sowie einem Mensch Maschine Interface abgebildet.

Das Kernelement der Arbeitszelle ist der Endeffektor. Innerhalb der Arbeitszelle können ein einzelner oder mehrere Endeffektoren verwendet werden. Dieser Endeffektor besitzt die zuvor konfigurierten Module, welche als Datensatz in die Steuerung geladen wurden. Ein Endeffektor nutzt also beispielsweise einen Roboter und dessen Capability „move“ zur Positionierung im Arbeitsraum.

Module, welche eine eigene Steuerung besitzen, nutzen zur Kommunikation mit dem Steuerungssystem eine Applikation. Diese Applikation kann geräteunabhängig genutzt werden und bietet eine einheitliche Schnittstelle zu unterschiedlichen Modulausprägungen einer Klasse. Beispielsweise wird eine Roboter Applikation genutzt, welche nach einer Implementierung der Schnittstelle auf dem entsprechenden Robotertyp verwendet werden kann, um z.B. Fahrbefehle (bspw. fahre linear, fahre PTP) und Positionen durch das Steuerungssystem an den Roboter zu übermitteln. Dies ist in Kapitel 6.6.4 bei der technischen Umsetzung im Detail beschrieben. Dieser Aufbau ermöglicht wie in Abbildung 6.7 dargestellt den flexiblen Austausch der einzelnen Komponenten.

Die benötigten Sicherheitskomponenten werden im Zuge einer Gefährdungsanalyse bestimmt und in der Arbeitszelle integriert. Sie überwachen den sicheren Ablauf des Prozesses. Bei veränderten Randbedingungen können sie flexibel angepasst werden.

Durch die Mensch-Maschine Schnittstelle kann eine Interaktion mit dem Nutzer erfolgen. Beispielweise können Benutzereingaben getätigt oder der Prozessfortschritt visualisiert werden. Zusätzlich können Anpassungen und Inbetriebnahmevorgänge durchgeführt werden. Die praktische Ausführung der Benutzerschnittstelle ist in Kapitel 6.6.2 beschrieben. Ebenso besteht eine Schnittstelle zu einem übergelagerten Produktionssteuerungssystem oder einem Produktgedächtnis. Dies ermöglicht eine flexible Übertragung und Austausch der Work List im Arbeitsablauf beispielsweise zur Anpassung an verschiedene Varianten.

Innerhalb der Realisierung der Methodik als softwaretechnische Benutzerschnittstelle und dem Steuerungskonzept der Anlagensteuerung wurden Werkzeuge zur praktischen Nutzung der Methodik geschaffen. Diese werden im folgenden Kapitel vorgestellt.

6.6 Systemelemente zur Planung und Prozessausführung

Um eine Durchgängigkeit und Konsistenz der Daten zu erreichen, wird die Komposition von Diensten in der Work List und die Konfiguration von Modulen in einer Software umgesetzt. Die Integration erfolgt in ein standardisiertes Steuerungskonzept als modulare Bausteine. Innerhalb dieses Kapitels werden die Umsetzung einer Benutzerschnittstelle zur Konfiguration und Rekonfiguration, der Aufbau des Steuerungskonzepts und die Umfänge der Software zur Inbetriebnahme, dem Testen und der Prozessdarstellung gezeigt.

6.6.1 Konzeption und Spezifikation der Systemelemente

Wichtigste Grundanforderung an das System ist die intuitive Bedienbarkeit ohne tiefgreifende Programmierkenntnisse. Die bisher aufwendige Programmierung soll weitestgehend durch Parametriervorgänge ersetzt werden. Ziel ist eine Abdeckung und Wiederverwendung der gängigen Verantwortlichkeiten und Betriebsmittel, um den Planungsaufwand erheblich zu reduzieren. Bei erstmaliger Benutzung oder Verwendung einer Sonderlösung kann diese separat durch einen spezialisierten Programmierer umgesetzt und dem System zur Verfügung gestellt werden. Im Folgenden werden die Anforderungen zur Konzeption und Spezifikation der Software und des Steuerungskonzeptes beschrieben.

Konzeption und Spezifikation der Konfigurationssoftware

Die Software muss zur Erstellung der Work List und Konfiguration der Module geeignet sein. Zusätzlich sollen Funktionalitäten zur Inbetriebnahme und Test sowie eine Prozessübersicht und Führung umgesetzt werden.

In der praktischen Anwendung soll die Möglichkeit bestehen flexibel Operationen hinzuzufügen oder verschieben zu können (Bspw. hinzufügen, verschieben oder entfernen von Schraubpunkten). Ebenso sollen Prozessparameter der Operationen und Koordinaten einfach veränderbar sein (Bspw. Drehmoment einer Verschraubung, Lage einer Verschraubung). Hierzu sollen einfache Konfigurationsmöglichkeiten innerhalb

des Programms implementiert werden, welche es ermöglichen eine einfache (Re-) Konfiguration der Anlage ohne Programmierarbeiten durchzuführen.

Folgende Funktionen sollen hierzu abgebildet werden:

- Erstellen der Work List
 - Planung des prozeduralen Prozessablaufs
 - Hinzufügen von Jobs
 - Konfiguration der Jobs
 - Automatisierter Export der Work List in das Steuerungssystem.
- Konfiguration der Modulusprägung und damit der techn. Lösung.
 - Zuordnung von Modulklassen zu den benötigten Capabilities der Work List.
 - Auswahl der Modulusprägung basierend auf den benötigten Diensten und techn. Parametern der Work List.
 - Parametrierung der Modulusprägungen
 - Generieren von Bausteinen der Modulusprägungen zum Steuerungsexport.
- Inbetriebnahme und Test
 - Inbetriebnahme der vorhandenen Module
 - Rekonfiguration der vorhandenen Work Lists und ihrer Jobs.
 - Live-Mode: Live-Aufruf von Methoden der vorhandenen Module und Starten von Work Lists.
- Prozessführung und -übersicht
 - Darstellung des aktuellen Anlagenzustands
 - Anzeige prozessspezifischer Informationen und Parameter
 - Möglichkeit zur Nutzerinteraktion und Durchführung von Benutzereingaben.

Konzeption des Steuerungskonzeptes

Zur Integration der Module wird ein einheitliches Steuerungskonzept in der Anlagensteuerung implementiert. Dieses soll folgende Funktionalitäten erbringen:

- Standardisiertes Konzept, welches unverändert bleibt und indem die individuellen Modulusprägungen und Work Lists als Bausteine eingebunden werden können.
- Möglichkeit der Selbstidentifikation der vorhandenen Module und Work Lists.
- Fähigkeitsabgleich, ob zur Ausführung der Work List alle benötigten Modulusprägungen zur Verantwortlichkeitserfüllung vorhanden sind.
- Flexibler Austausch von Modulen und Work Lists.
- Automatisierte Durchführung des Prozessablaufs basierend auf der Work List und dynamische Zuweisung der Jobs zu den Modulusprägungen.
- Einheitliche Schnittstellen zur Software und den angebotenen Systemelementen.

6.6.2 Configuration and Reconfiguration User Interface

Zur Erfüllung der definierten Anforderungen wird das Gesamtkonzept zur Umsetzung wie in Abbildung 6.8 gezeigt aufgeteilt.

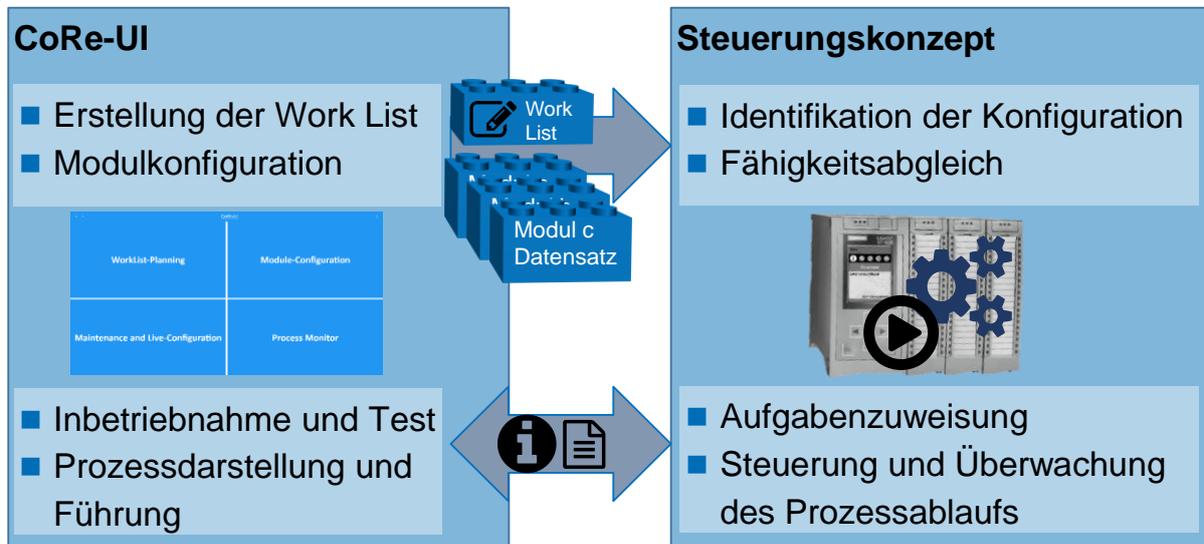


Abbildung 6.8: Systemelemente und Aufgaben

Die Bereiche der Work List Erstellung, Modulkonfiguration, die Inbetriebnahme und Test Umfänge sowie die Prozessführung werden in einer Softwareumgebung umgesetzt. Diese Umgebung wird als Configuration and Reconfiguration User Interface (CoRe-UI) bezeichnet. Zur Umsetzung des Steuerungskonzeptes wird eine einheitliche Software implementiert, welche auf gängigen speicherprogrammierbaren Steuerungen genutzt werden kann.

In Abbildung 6.9 ist die Aufteilung des CoRe-UI in vier Hauptfunktionen gezeigt.

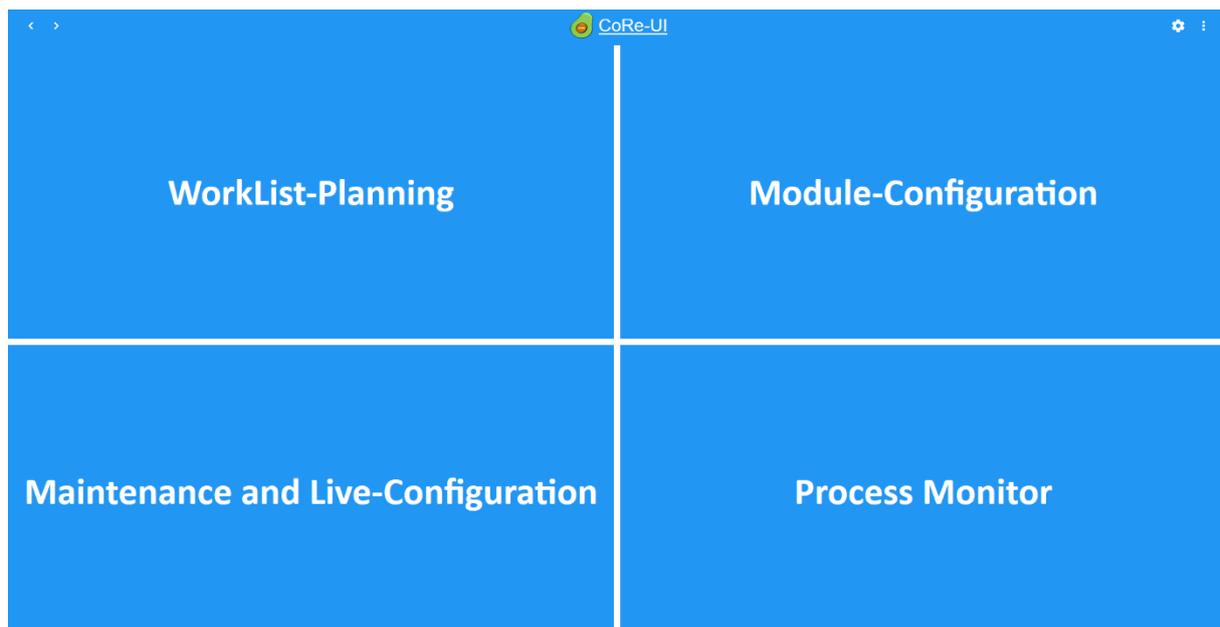


Abbildung 6.9: Hauptfunktionen des CoRe-UI

In dem Benutzerinterface sind die zuvor spezifizierten Teilschritte umgesetzt:

- Erstellen der Work List
- Betriebsmittelkonfiguration
- Inbetriebnahme und Test
- Prozessführung und -übersicht

Zunächst erfolgt als Gesamtübersicht die Darstellung des Aufbaus und der Funktionalitäten der Software.

Aufbau und Aufteilung der Funktionalitäten zwischen Steuerungskonzept und CoRe UI

Abbildung 6.10 zeigt den Aufbau und die Aufteilung der Funktionalität der Software

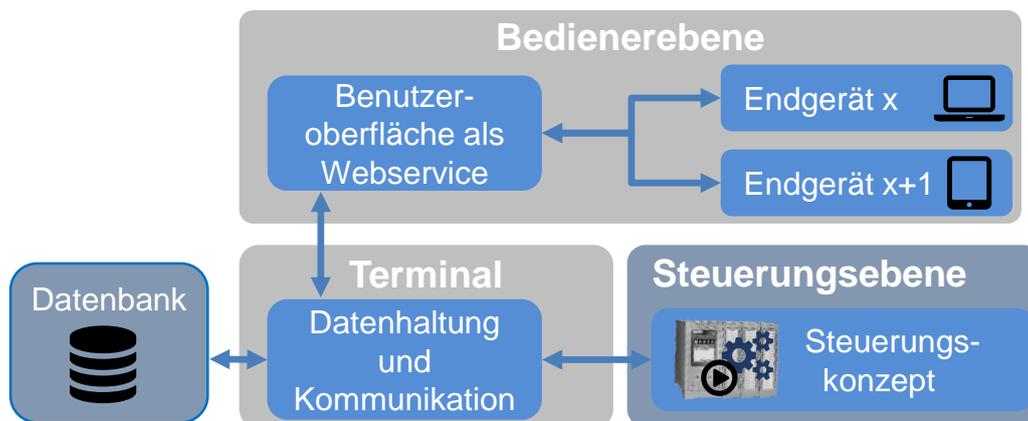


Abbildung 6.10: Aufteilung der Funktionalitäten innerhalb Software

Die beiden Kernelemente der Software sind die Bediener Ebene und das Terminal, welche mit der Steuerungsebene und dem darauf verwendeten Steuerungskonzept sowie einer Datenbank verbunden sind. Zwischen diesen Elementen bestehen Schnittstellen zur Übertragung der Datensätze und Übermittlung von Daten zur Inbetriebnahme und Erstellung einer Prozessübersicht. Die Planungsdaten werden aus der Datenbank bezogen, welche alle bereits erstellten Modulausprägungen enthält. Im Terminal erfolgen die Datenhaltung und die Steuerung der Kommunikation zwischen den Teilelementen. Um die Software mit mehreren Nutzern und ortsunabhängig nutzen zu können, wird eine Verwendung auf verschiedenen Endgeräten ermöglicht. Hierzu wird die Benutzeroberfläche als Webservice implementiert. Die Daten werden über einen Server bereitgestellt und können von jedem Benutzer, welcher sich in die Oberfläche einloggt abgerufen werden. Die Datenhaltung, -austausch und Schnittstellen sind in Kapitel 6.6.4 detailliert beschrieben.

Um bei Bedarf den Zugriff auf einzelne Funktionen des Programms beschränken zu können, wurde die Möglichkeit geschaffen, bedarfsgerechte Benutzerklassen anzulegen. Über eine Login-Funktion kann die Anmeldung und Freischaltung der gewünschten Funktionsumfänge der Benutzerklassen erfolgen.

Im Folgenden werden nun die softwareunterstützte Modulkonfiguration beschrieben, im Anschluss das Steuerungskonzept und danach die Teilbereiche der Software zur Inbetriebnahme und Prozessausführung.

Erstellung der Work List und Modulkonfiguration im CoRe-UI

Work List Erstellung

Zur Abbildung des durchzuführenden Prozesses werden Dienste zur Erfüllung der Unterverantwortlichkeiten intuitiv und ohne komplexe Programmierkenntnisse sinnvoll zu Arbeitsabläufen komponiert. Grundlage bildet die in Kapitel 6.2 beschriebene Work List.

Der Ablauf der Work List Erstellung innerhalb des CoRe-UI startet mit der Auswahl einer bestehenden Liste oder dem Anlegen einer neuen Liste. Zur Anpassung und Wiederverwendung können die Namen der Work Lists geändert und die Reihenfolge der Jobs angepasst werden.

Zur Erstellung einer Work List werden Jobs aus einer Liste an verfügbaren Jobs ausgewählt und in das System hinzugefügt. Im Anschluss können diese parametrisiert und angepasst werden (bspw. die Angabe einer Geschwindigkeit bei einem Bewegungsbefehl). Sämtliche Eigenschaften von Jobs sind mit Initialwerten versehen, sodass eine ausführbare Version einer Work List automatisch generiert wird und die Datenkonsistenz sichergestellt ist. Alle hinzugefügten Jobs können innerhalb der Liste verschoben oder bei Bedarf entfernt werden.

Ist eine Work List fertiggestellt, kann über eine Exportfunktion ein Work List Datensatz durch den Benutzer gespeichert und später an das Steuerungssystem übertragen werden.

In Abbildung 6.11 ist die Erstellung einer Beispiel Work List gezeigt. Hier ist die Positionierung einer Beleuchtungseinrichtung durch einen Roboter abgebildet.

Abbildung 6.11: Erstellung einer Work List

Auf der linken Seite in Abbildung 6.11 ist eine Übersicht der Work List mit den hinzugefügten Jobs zu sehen. Hier ein Bewegungsbefehl zu einer Position, Einschalten einer Beleuchtung, warten, Ausschalten der Beleuchtung und eine erneute relativ Bewegung. In der rechten Spalte können die in der Datenbank vorhandenen Jobs in einem Drop-Down Menü ausgewählt und zur Liste hinzugefügt werden. Wird ein Job ausgewählt, werden seine Eigenschaften angezeigt. Dies ist im mittleren Bereich für den Job „moveREL“ dargestellt. In der rechten Spalte können die Jobs der Work List parametrisiert werden. Beispielsweise kann hier eine Geschwindigkeit oder Position bei einem Bewegungsbefehl vorgegeben werden.

In der unteren Menüleiste sind vier Funktionen hinterlegt:

1. Bestätigung der Work List und Wechsel zur Konfiguration der Modulausprägungen
2. Generierung eines Datensatzes aus der Work List zur Steuerungsintegration
3. Erstellen einer neuen Work List
4. Hinzufügen des ausgewählten Jobs zur Work List

Sind alle durchzuführenden Prozessschritte zur Work List hinzugefügt worden, kann in den Bereich der Konfiguration der Modulausprägungen gewechselt werden.

Modulkonfiguration

Im Bereich der Modulkonfiguration werden die zur Erfüllung der Verantwortlichkeiten der Work List benötigten Modulausprägungen und somit die Betriebsmittel als technische Lösung ausgewählt. Hierzu werden passende Modulausprägungen aus der Datenbank vorgeschlagen und der Nutzer kann eine Auswahl treffen. Die Struktur der Datenbank und Datenhaltung ist in Kapitel 6.6.4 beschrieben. Zur einfachen und übersichtlichen Auswahl werden die Modulausprägungen entsprechend der Capabilities des angewählten Jobs angezeigt. Über eine Filterfunktion kann, nach Merkmalen kategorisiert, sortiert werden. Die Betriebsmittel müssen nach der Auswahl parametrisiert werden, um der Steuerung zu ermöglichen, auf die Methoden der verwendeten Module zuzugreifen. Im Anschluss können die passenden Datensätze direkt erzeugt und exportiert werden. Ist keine Modulausprägung zur Erfüllung der Verantwortlichkeit vorhanden, kann ein neuer Eintrag in der Datenbank mit einem passenden Betriebsmittel angelegt werden.

Der Ablauf der Modulkonfiguration im CoRe-UI ist in Abbildung 6.12 dargestellt.

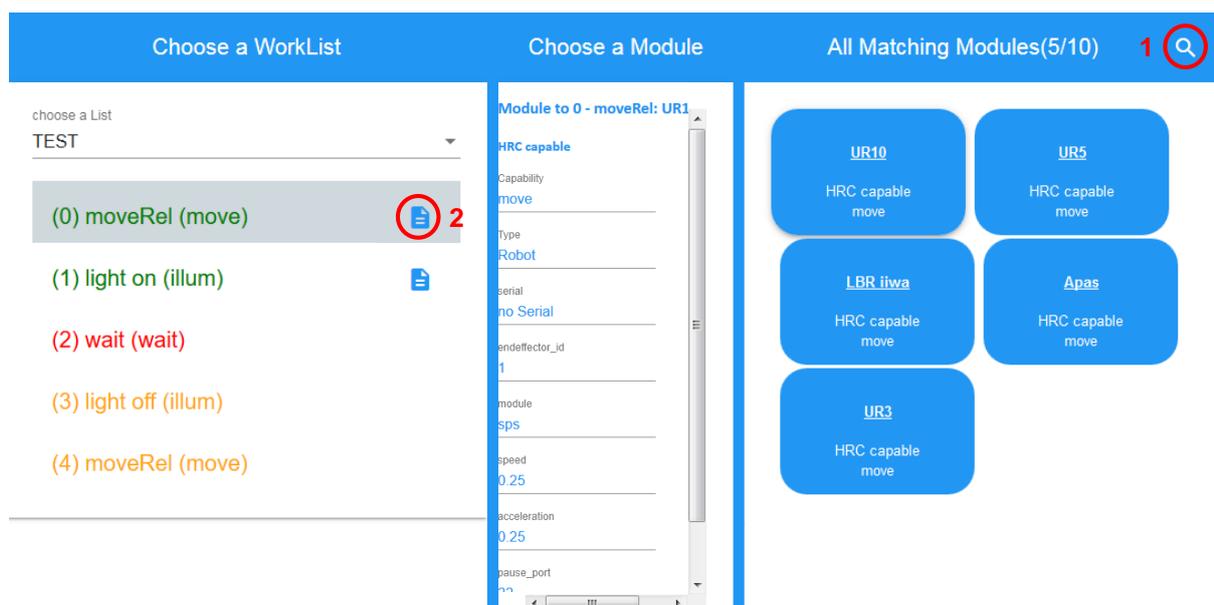


Abbildung 6.12: Ablauf der Modulkonfiguration

In der linken Spalte der Konfigurationsansicht ist die gewählte Work List dargestellt. Zu allen darin enthaltenen Jobs können nun passende Modulausprägungen bestimmt werden. Als Beispiel wird hier eine Auswahl passend zum Job der Verfahrbewegung getroffen. Jeder Job ist in der Übersicht mit seiner benötigten Capability in Klammern aufgeführt. Die Modulausprägungen, welche diese Capability anbieten sind in der rechten Spalte dargestellt. In diesem Fall die Modulausprägungen der Klasse „Robot System“ mit der Capability „move“. Sollen die Betriebsmittel sortiert, durchsucht oder gefiltert werden, kann dies durch den Nutzer mit einer Filterfunktion (1. in Abbildung 6.12) durchgeführt werden. Sobald ein passendes Betriebsmittel zu einem Job ausgewählt wurde, wird dieser Eintrag der Work List grün hinterlegt. Die weiteren Jobs, welche die gleiche Capability benötigen werden gelb hinterlegt. Nach einer Prüfung, ob die benötigten technischen Parameter ebenfalls durch die zuvor bestimmte Ausprägung erfüllt werden können, kann eine Ausprägung mehreren Jobs zugewiesen werden. Im Falle des „move“ Befehls wird beispielsweise überprüft, ob alle Bewegungsbefehle durch einen Roboter abgedeckt werden können und dieser dann den entsprechenden Jobs zugeordnet.

Die Eigenschaften der gewählten Betriebsmittel werden in der mittleren Spalte dargestellt. Hier können Parametrierungen vorgenommen werden. In diesem Beispiel kann dem Roboter unter anderem ein Geschwindigkeitswert oder eine Beschleunigung, sowie eine IP-Adresse zur Kommunikation mit der Steuerung vorgegeben werden. In diesem Beispiel wurde für jede benötigte Capability bis auf den Job „wait“ eine Modulausprägung bestimmt. Zu jedem konfigurierten Betriebsmittel kann der passende Datensatz erzeugt und exportiert werden (2. in Abbildung 6.12).

Als Ergebnis dieser Konfiguration stehen also die benötigten Modulausprägungen in Form von technischen Lösungen als Betriebsmittel fest. Zur Integration in die Steuerung werden Datensätze der Work List und für die jeweiligen Betriebsmittel generiert.

Diese werden nun in das Steuerungskonzept übertragen. Der Aufbau des Steuerungskonzeptes und die Vorgehensweise zur Integration der Datensätze und die Steuerung des Prozessablaufs werden Kapitel 6.6.3 beschrieben. Im nächsten Abschnitt wird die Bedienerschnittstelle zur Inbetriebnahme und Prozessführung des CoRe-UI beschrieben.

Bedienerschnittstelle zur Inbetriebnahme und Prozessführung

Zur Rekonfiguration und der Inbetriebnahme einer Montagestation müssen Funktionen zur Verfügung stehen, welche Zugriff auf die aktuellen Work Lists und Jobs in der Steuerung bieten. Die Parameter dieser Bausteine sollen eingesehen und geändert werden können. Weiterhin muss es möglich sein einzelne Jobs und Work Lists testweise auszuführen, um die Inbetriebnahme durchzuführen.

Während des Prozessablaufes soll der Status des Prozesses für den Benutzer einsehbar sein. So soll die aktuell ausgeführte Work List, sowie der aktuell ausgeführte Job angezeigt werden. Auch eine Information ob bestimmte Jobs erfolgreich durchgeführt wurden soll dokumentiert und ausgegeben werden. Über eine Schnittstelle müssen Meldungen erfolgen und Benutzereingaben getätigt werden können.

Die Umsetzung der Systemelemente innerhalb des Core-UI wird im Folgenden beschrieben.

Rekonfiguration und Test

Im Bereich Inbetriebnahme und Test des CoRe-UI werden alle im Steuerungssystem vorhandenen und ausführbaren Work Lists und Jobs angezeigt. Die Listen können bearbeitet werden, indem vorhandene Jobs hinzugefügt und gelöscht oder die Parameter der Jobs angepasst werden. Zu Inbetriebnahmezwecken können einzelne Jobs ausgeführt werden oder ganze Work Lists gestartet werden. Nach Laden der aktuellen Daten der Steuerung können die genannten Vorgänge in der Software ausgeführt werden. Dies ist in Abbildung 6.13 gezeigt.

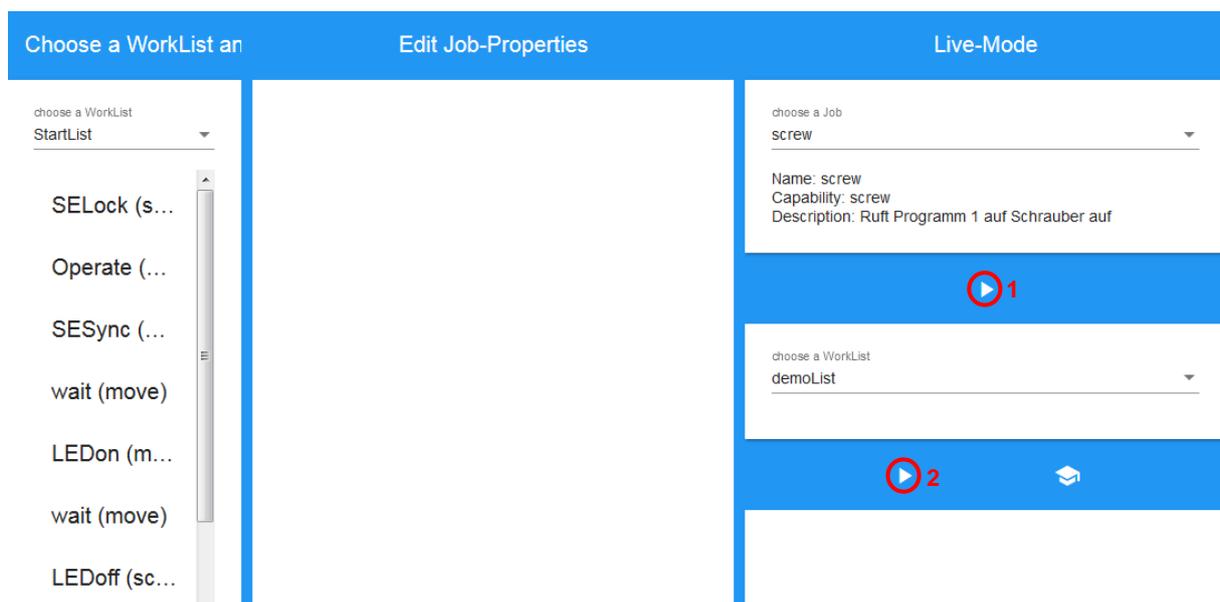


Abbildung 6.13: Inbetriebnahme und Test Funktionen des CoRe-UI

In der linken Spalte werden nach erfolgreichem Download von der Steuerung alle vorhandenen Work Lists angezeigt. In der mittleren Spalte werden die Jobs der Work List angezeigt und können bearbeitet werden.

In dieser Ansicht sind die Eigenschaften des Jobs „LEDon“ dargestellt und können bearbeitet werden. In der rechten Spalte stehen die Funktionen zum Test und Inbetriebnahme zur Verfügung. Es können einzelne Jobs ausgewählt und gestartet werden (Abbildung 6.13 Punkt 1). Ebenso kann eine komplette Work List ausgeführt werden (Abbildung 6.13 Punkt 2). Die durchgeführten Änderungen können, wie in der oberen rechten Ecke der Abbildung 6.13 zu sehen, an das Terminal oder die Steuerung übertragen werden.

Prozessübersicht und Prozessinteraktion

Der Bereich Prozessübersicht und Prozessinteraktion kann individuell für jeden Prozess angepasst werden. Zur Darstellung des Status werden die aktuell ausgeführte Work List, der aktuell ausgeführte Job, sowie das Ergebnis des zuletzt ausgeführten Jobs angezeigt. Um Interaktionen mit dem Benutzer zu ermöglichen, wurde eine Schaltfläche integriert, in der eine Nachricht angezeigt werden kann und eine Benutzerabfrage getätigt werden kann. Die Oberfläche in der Software ist in Abbildung 6.14 dargestellt.

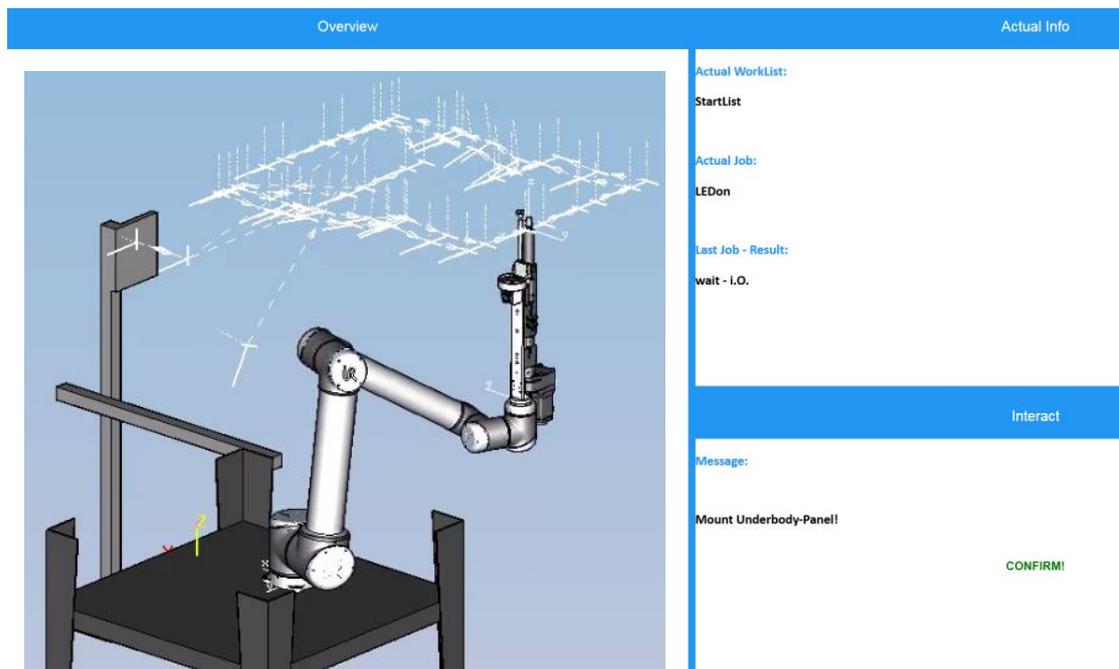


Abbildung 6.14: Prozessübersicht und -Interaktion im CoRe-UI

Auf der linken Seite kann eine Prozessübersicht in Form der zu montierten Bauteilen oder einer Darstellung der nächsten durchzuführenden Prozessschritte angezeigt werden. In der rechten Spalte werden der aktuell ausgeführte Job, die aktuell ausgeführte Work List und der Status des zuletzt ausgeführten Jobs abgebildet. Darunter befindet sich ein Feld zur Interaktion. So können Nachrichten angezeigt und durch den Bediener Eingaben getätigt werden. Eine praktische Ausführung der Benutzeroberfläche wird in Kapitel 7.5.3 gezeigt.

6.6.3 Steuerungskonzept zur Modulintegration und Prozessausführung

Wie in Kapitel 2.2.3 dargestellt, bietet eine serviceorientierte Steuerungsarchitektur (SOA) die Möglichkeit ein Montagesystem rekonfigurierbar und flexibel zu gestalten und ein reproduzierbares Systemverhalten sicherzustellen. Für diesen Anwendungsfall wird daher eine serviceorientierte Architektur in Kombination mit Broker Funktionalitäten genutzt. Zunächst wird beschrieben, wie die Work List, die Jobs und die Module im Steuerungskonzept umgesetzt sind.

Integration der Work List

Die Work List und die Jobs sind innerhalb des Steuerungskonzeptes wie in Abbildung 6.15 gezeigt als Klassen abgebildet.

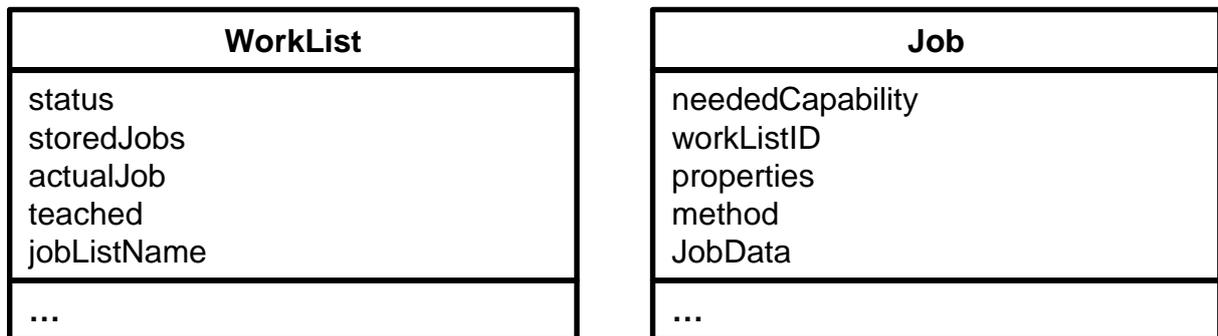


Abbildung 6.15: Work List und Job Klasse

Jede Work List hat einen eindeutig identifizierbaren Namen („jobListName“) und eine Auflistung der vorhandenen Jobs („storedJobs“). Diese Auflistung der Jobs entspricht der zuvor generierten Work List, gemäß derer die definierten Jobs in einer festgelegten Reihenfolge durchgeführt werden. Die Jobs stellen im Sinne der serviceorientierten Architektur die Konsumenten von Diensten dar. Diese sind im Steuerungskonzept wie folgt umgesetzt:

Job / System Job

Wie bereits in 6.2 erklärt, verfügt ein Job über zwei wesentliche Beschreibungsattribute zur Realisierung der Unterverantwortlichkeit, die „capability“ und „method“. Zusätzlich sind Attribute vorhanden, welche die Zugehörigkeit zu einer Work List angeben („workListID“) und zur Job Ausführung genutzt werden („properties“, „JobData“).

Auch Systemjobs verfügen über die Attribute „capability“ und „method“ zur Festlegung der Verantwortlichkeitserfüllung. Im Gegensatz zu einem Job bilden System Jobs die Erfüllung einer Unterverantwortlichkeit unter Verwendung mehrerer Modulausprägungen ab.

Module im Steuerungskonzept

Die Datensätze der Module werden im Steuerungskonzept als Datenbausteine realisiert. Die Struktur entspricht dem im Kapitel 6.3 vorgestellten Modularisierungskonzept und ist in Abbildung 6.16 dargestellt. Ein Datenbaustein repräsentiert hierbei ein Betriebsmittel mit einer eindeutigen Konfiguration. Somit sind die Modulausprägungen

und ihre ausführbaren Methoden für die Erfüllung der Verantwortlichkeiten nutzbar und stellen im Sinne einer SOA die Anbieter von Diensten dar.

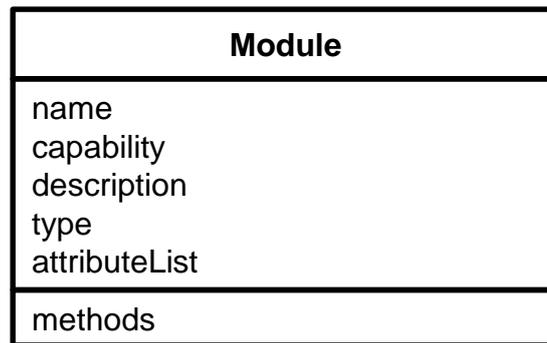


Abbildung 6.16: Modul Datenbaustein

Für die spätere Generierung von Bausteinen zum Modulimport in die Steuerung, müssen die Modulausprägungen über das Attribut „type“ klassifiziert werden, da verschiedene Modulklassen verschiedene Bausteine bedeuten. Zur Zuordnung spezifischer Parameter und Beschreibungsattribute zu den Modulausprägungen wird das Attribut „attributeList“ verwendet. Hiermit lassen sich dynamisch Beschreibungsattribute zu den einzelnen Ausprägungen zuordnen, welche später für verschiedene Funktionen genutzt werden können.

Aufbau des Steuerungskonzeptes

Wie eingangs beschrieben ist das Steuerungskonzept in einer serviceorientierten Architektur mit Broker Funktionalitäten umgesetzt. Die Abbildung der Anlagentopologie innerhalb des Steuerungskonzeptes lehnt sich wie in Kapitel 6.5.2 beschrieben an die Struktur der RollClassLibrary in AutomationML an. Der Kern des Steuerungskonzeptes stellt eine Arbeitszelle (Workcell) dar, innerhalb derer der Prozess ausgeführt wird. Die Grundstruktur ist in Abbildung 6.17, die Klasse in Abbildung 6.18 links dargestellt. In der Workcell können ein oder mehrere Endeffektoren genutzt werden („usedEndeffectors“). Der Übersichtlichkeit halber wird im Folgenden eine Workcell mit einem Endeffektor betrachtet. Ebenso können Benutzerschnittstellen (HMI Modul) verwaltet werden („usedHMI“).

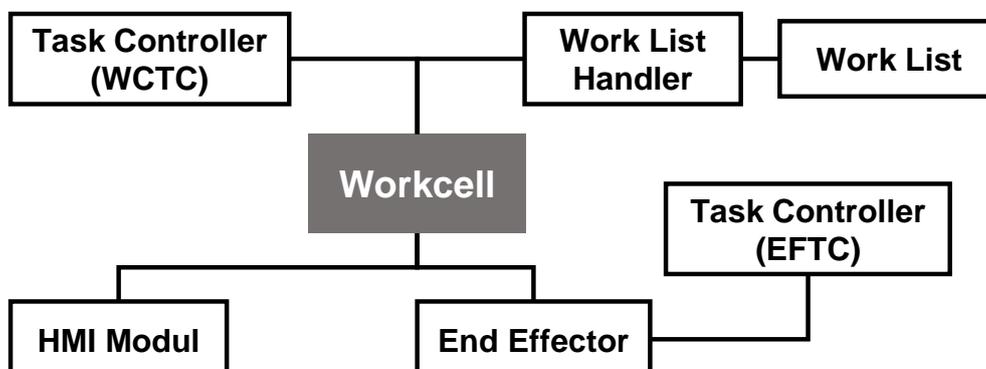


Abbildung 6.17: Aufbau und Elemente des Steuerungskonzeptes

Die Workcell hat zur Aufgabenverwaltung Task Controller („WCTC“), zusätzlich besitzt jeder Endeffektor einen eigenen Task Controller („EFTC“).

Task Controller agieren als eine Art Broker innerhalb des Systems und übernehmen Vermittlungs- und Überwachungsaufgaben. Sie führen die Zuordnung der Jobs zu den ausführenden Systemelementen aus und überwachen deren Ausführung.

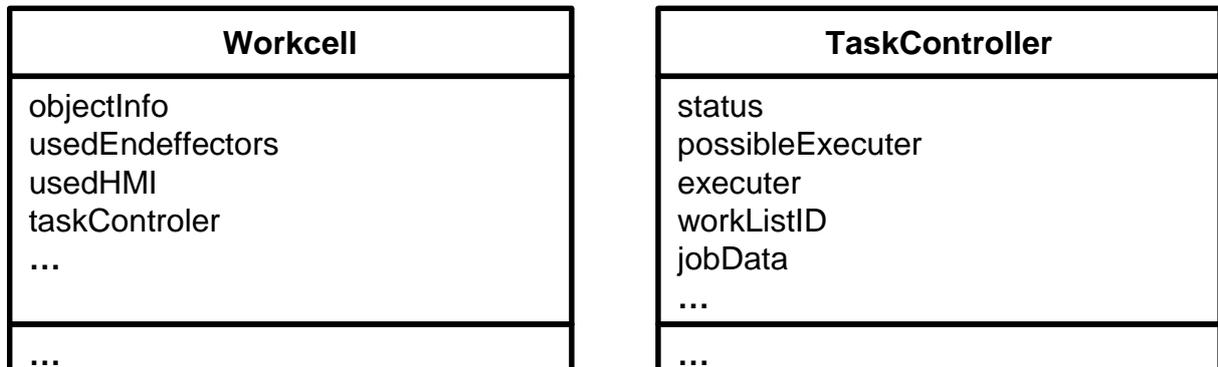


Abbildung 6.18: Workcell und Task Controller Klasse

Die Klasse Task Controller (Abbildung 6.18 rechts) enthält eine Übersicht aller Systemelemente, welche zur Ausführung von Jobs genutzt werden können („possibleExecuter“) und die Daten der Jobs welche ausgeführt werden sollen („jobData“, „workListID“). Die „possibleExecuter“ entsprechen den Modulausprägungen und können im Sinne der serviceorientierten Architektur auch als Dienstanbieter bezeichnet werden. Die weiteren verfügbaren Attribute und Methoden sind im Anhang I gezeigt.

Um die ordnungsgemäße Ausführung eines Jobs oder das Laden einer Work List in die Arbeitszelle durchzuführen wird ein Work List Handler (Abbildung 6.19) genutzt. Dieser extrahiert die Jobs aus der Work List und reicht sie an den Task Controller der Arbeitszelle weiter. Zusätzlich verfügt der Work List Handler über ein Ethernet Interface, welches von dem CoRe-UI zur Kommunikation genutzt wird (Siehe. Kap 6.6.4), um Informationen weiterzuleiten und eine Bearbeitung der Work List zuzulassen. Dies wird insbesondere für die Inbetriebnahme und Test sowie die Prozessführung und -übersicht (Siehe Kap 6.6.2) genutzt. Alle verfügbaren Work Lists („storedLists“) und alle ausführbaren Dienste („possibleTasks“) werden in den Work List Handler geladen. Eine Übersicht der weiteren verfügbaren Methoden für Verwaltungsaufgaben innerhalb des Steuerungskonzeptes ist im Anhang I gezeigt.

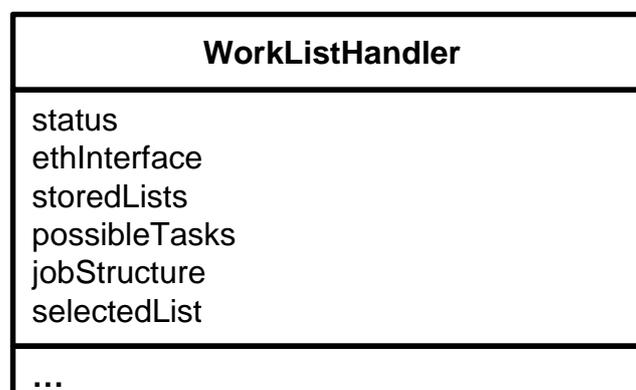


Abbildung 6.19: Work List Handler

Ein weiteres wichtiges Element ist der Endeffektor (Klassendiagramm siehe Anhang I). Er bildet wie bereits in der Anlagentopologie in Kapitel 6.5.2 beschrieben das zentrale Element der Arbeitszelle und führt in ihr automatisiert die ihm zugewiesenen Aufgaben aus. Zur Durchführung dieser Aufgaben nutzt der Endeffektor die verschiedenen Komponenten aus dem modularen Baukasten (Vgl. Kapitel 6.3.2).

Zur Positionierung innerhalb der Arbeitszelle kann der Endeffektor einen Roboter („usedRobot“) nutzen. Zur Erweiterung des Arbeitsraums oder Synchronisierung mit dem Montageobjekt greift er auf Transportsysteme („transportSystems“) zurück. Um die spezifischen Aufgaben durchzuführen, verfügt der Endeffektor über die benötigten Sensoren, Werkzeuge oder Output Devices („connectedParts“). Ebenfalls hat ein Endeffektor, wie bereits zuvor beschrieben, zur Aufgabenverwaltung einen Task Controller („EFTC“). Um die Bearbeitung eines Jobs temporär zu unterbrechen ist ein Pause-Modus verfügbar („pause“).

Nach der Beschreibung des grundlegenden Systemaufbaus wird nun die Ausführung des Steuerungssystems von der Initialisierung bis zur Prozessdurchführung beschrieben.

Systeminitialisierung

Beim Starten der Steuerung und dem Hochfahren des Steuerungssystems, werden die folgenden Initialisierungsvorgänge ausgeführt:

1. Einlesen aller Datensätze der Steuerung: Es werden selbstständig alle Datensätze erfasst und klassifiziert. Die Datensätze werden in einem Verzeichnis abgelegt, von wo aus sie später aufgerufen werden können.
2. Initialisieren des Ethernetmoduls: Zurücksetzen auf definierten Ausgangszustand, um eine fehlerfreie Funktion zu gewährleisten.
3. Initialisieren der Workcell: Initialisieren aller Attribute, z. B. die Zahl der Endeffektoren.
4. Initialisieren des TaskControllers: Initialisieren des Status, aller Attribute und der possibleExecuter.
5. Initialisieren der Endeffektoren der Workcell: Initialisieren der Attribute jedes Endeffektors der Workcell.
6. Hinzufügen der initialisierten Endeffektoren zum Verzeichnis der Workcell („usedEndeffectors“).
7. Initialisieren des Work List Handlers: Zurücksetzen des Status, Initialisieren von Subkomponenten, wie zum Beispiel der Ethernetmodule, laden aller vorhandenen Lists und ausführbaren Methoden.

8. Hinzufügen der verbleibenden Datensätze (Systemelemente) zur den zugehörigen Endeffektoren: Alle weiteren noch nicht behandelten Datensätze werden aufgerufen und initialisiert. Dabei erfolgt je nach Klassifizierung eine unterschiedliche Prozedur:
 - Das Element ist eine mechatronische Komponente: Sämtliche mechatronische Komponenten werden auf Plausibilität überprüft und initialisiert. Dabei werden z. B. digitale Ausgänge zurückgesetzt und der Status initialisiert. Die ausführbaren Methoden der Elemente werden einem Provider („possibleExecuter“) zugeordnet und sie werden einem Endeffektor hinzugefügt.
 - Das Element ist eine Work List: Der Work List wird ihr Name zugeordnet und die Plausibilität der Liste geprüft. Zu jedem enthaltenem Job wird ein Provider gesucht, wird kein Provider der gesuchten Dienstleistung gefunden, ist die Work List nicht ausführbar. Ebenso wird geprüft ob die Work List in sich stimmig ist, ausgeführt werden kann und alle Jobs korrekt parametrier sind.
9. Startup beendet, warten auf Eingaben und Abhören der Netzwerkverbindungen

Nach Abschluss der Initialisierung kann die Ausführung einer Work List begonnen werden.

Ausführung einer Work List

Soll eine Work List ausgeführt werden, muss diese von der Arbeitszelle einem Endeffektor zugeordnet werden, welcher die Ausführung übernimmt. Der Endeffektor Task Controller ordnet die einzelnen Jobs den angeschlossenen Modulausprägungen zu und überwacht die Ausführung. Der Ablauf wird im Folgenden am Beispiel einer Work List und einem Endeffektor beschrieben.

Zur Ausführung einer Work List wird diese zunächst über den Work List Handler gestartet. Hierzu wird dem Work List Handler der Name der Liste und ein Befehl zum Laden der Liste übergeben. Ist eine Liste mit dem angegebenen Namen vorhanden, werden die Eigenschaften der Liste überprüft und der erste Job der Liste wird in die Workcell geladen. Dieser aktuell in der Workcell befindliche Job wird dann ausgeführt. Nach der Job-Ausführung wird der nächste Job der Liste geladen und der vorherige Job überschrieben. Dies setzt sich fort bis zum letzten Job der Liste, wurde dieser bearbeitet ist die Work List abgeschlossen. Der strukturelle Ablauf ist in folgendem Sequenzdiagramm in Abbildung 6.20 dargestellt.

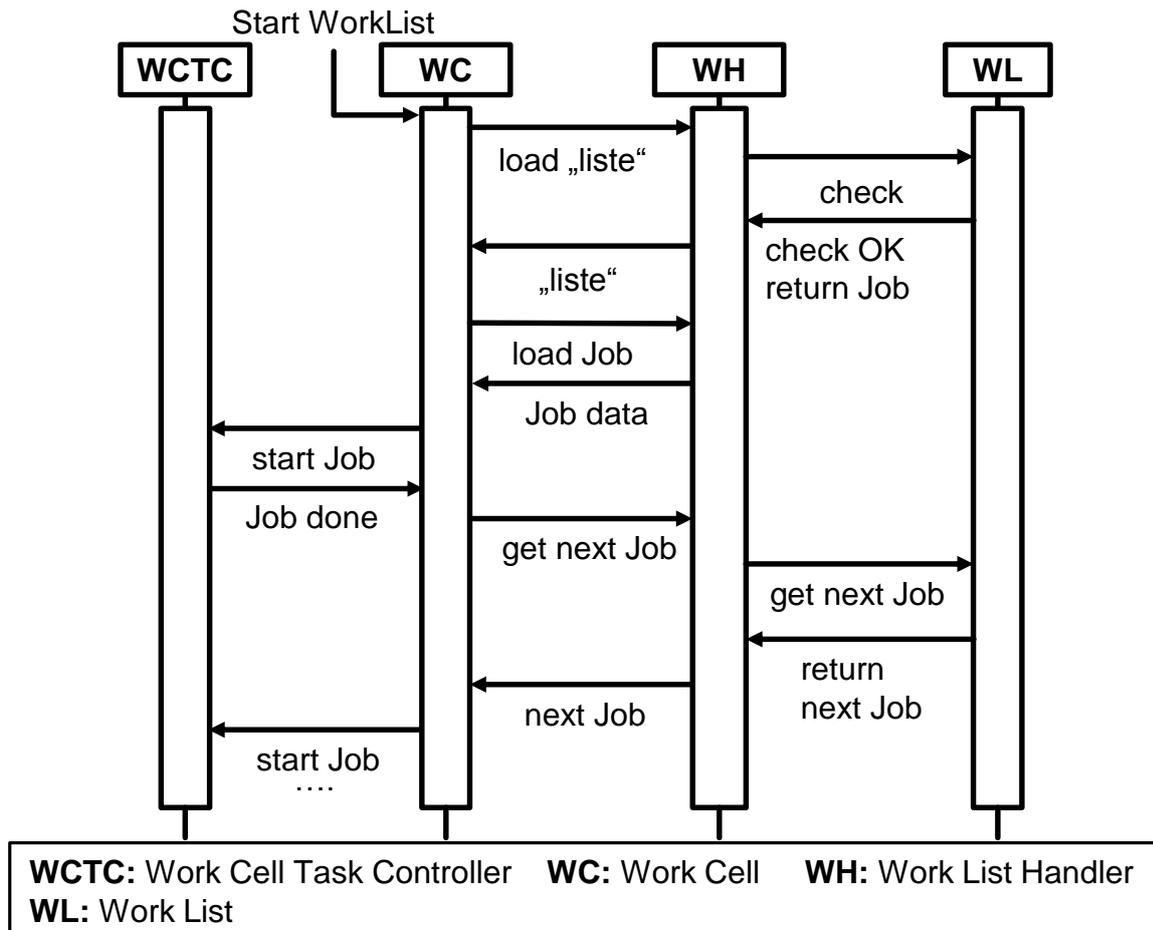


Abbildung 6.20: Ablauf der Work List Ausführung

Im Folgenden wird zwischen zwei Teilvorgängen unterschieden. Der Vorgang „addJob“ ist dafür verantwortlich, den Job einzulesen und einen entsprechenden Anbieter zu finden. Der Vorgang „doJob“ ist für die eigentliche Ausführung des Dienstes zuständig.

Zur Ausführung eines Jobs muss dieser zunächst einem Endeffektor hinzugefügt werden, welcher das für den Job benötigte Modul besitzt. Das Zuordnen und Laden geschieht in dem Vorgang „add Job“ der Workcell, welche die Aufgabe an den Work List Handler weitergibt. Der Work List Handler überprüft, ob der geforderte Dienst von einem der vorhandenen Provider bearbeitet werden kann. Ist dies der Fall, wird der Job über den Task Controller der Workcell in diese geladen. Anschließend wird über den Task Controller des Endeffektors (EFTC) der aktuelle Job zur Ausführung in den Endeffektor geladen. Hier wird dem aktuellen Job ein ausführender Anbieter (Provider/„executer“) über den Task Controller (EFTC) zugeordnet, welcher den Job ausführt. Vor der Ausführung wird am Provider abgefragt, ob der Dienstanbieter belegt oder verfügbar ist. Der Vorgang „add Job“ ist in Abbildung 6.21 dargestellt.

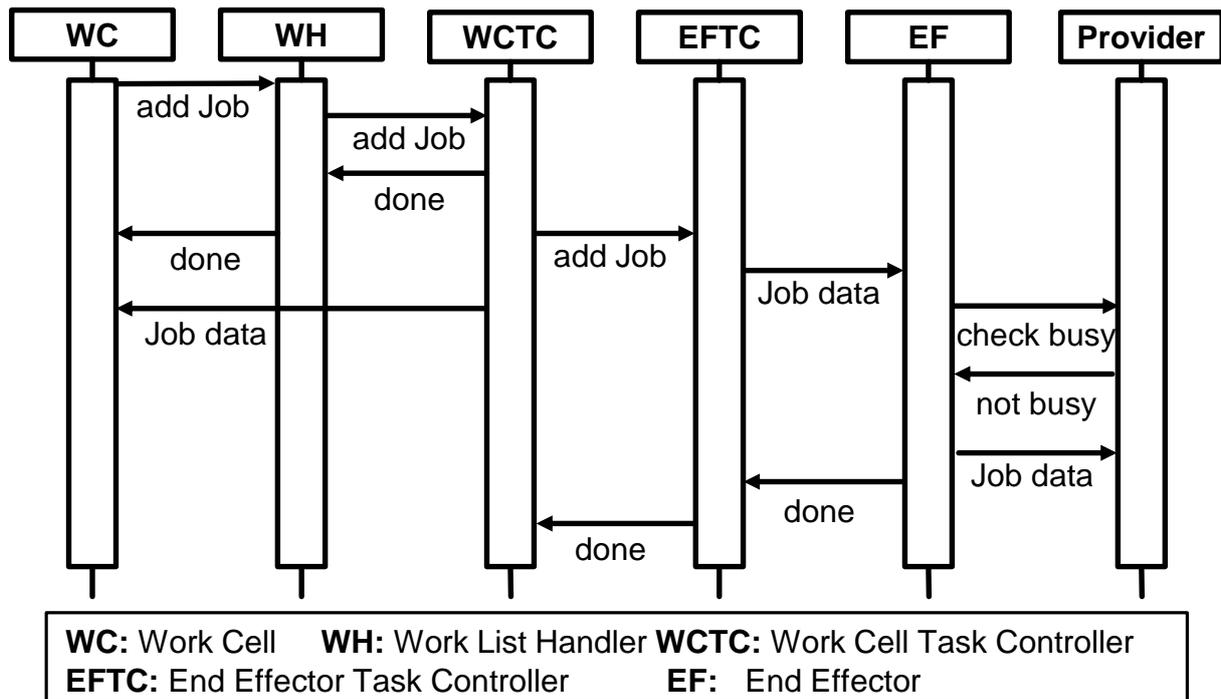


Abbildung 6.21: Hinzufügen eines Jobs zum Endeffektor

Nach Abschluss des Vorganges „add Job“ und dem erfolgreichen Hinzufügen des Jobs zu einem Endeffektor kann dieser ausgeführt werden. Hierzu wird der Befehl „do Job“ über die Workcell an den Task Controller (WCTC) weitergegeben. Der WCTC ruft den zur Job Ausführung benötigten Endeffektor auf. Dieser aktiviert seinen Task Controller (EFTC), welcher die Daten des Jobs an die Modulausprägung (Provider) weiterleitet, in welchem die Methode zur Ausführung (Service) aufgerufen werden kann. Dieser Ablauf ist in Abbildung 6.22 dargestellt.

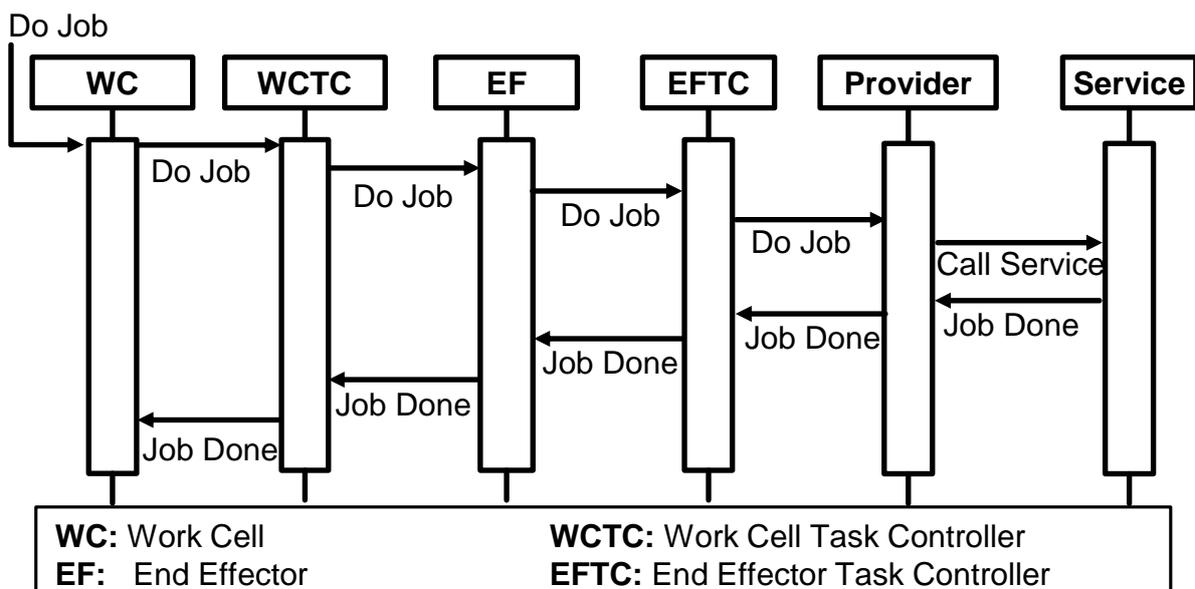


Abbildung 6.22: Ausführung eines Jobs durch den Endeffektor

Ist die Ausführung eines Jobs beendet, wird der Work List Handler beauftragt, den nächsten Job der Liste zu laden („nextJob“). Wird kein weiterer Job gefunden, gilt die Liste als abgeschlossen.

Überwachung des Anlagenzustandes und Prozessabbruch

Um einen sicheren Prozessablauf gewährleisten zu können, muss es möglich sein, einen Job oder eine gesamte Work List beim Eintreten bestimmter Zustände in einem definierten Vorgang zu unterbrechen. Beispielsweise ist es im Fließbetrieb bei einer Unsynchronität erforderlich, eine mitfahrende Montageeinheit vom Montageobjekt zu trennen und einen sicheren Zustand herzustellen. Hierzu muss vor jedem Aufrufen eines Jobs und während der Ausführung eine Überprüfung sicherheitsrelevanter Sensorik erfolgen. Zu dieser Sensorik gehören z.B. Sicherheitslaserscanner oder Endlagenschalter. Stellt ein Sensor einen nicht zulässigen Zustand fest, muss eine Operation oder eine Abfolge von Operationen eingeleitet werden. Um überprüfen zu können, ob die Anlage sich in einem sicheren Zustand befindet, wurde die Funktion „checkCondition()“ entwickelt. Sie kann allen Klassen hinzugefügt werden, welche entsprechende Schnittstelle besitzen. Diese Funktion stellt eine Routine zur Verfügung, um die Bedingungen eines sicheren Prozessablaufs individuell zu überprüfen. Um diese Prüfung durchzuführen, muss die Funktion möglichst häufig, also auch innerhalb der Bearbeitung von Jobs aufgerufen werden. Wenn die Abfrage eines Zustandes negativ verläuft, ein Modul sich also in einem nicht zulässigen Zustand befindet, wird ein definierter Abbruch eingeleitet. Hierzu kann dem Work List Handler eine Auswahl an Work Lists übergeben werden, welche je nach vorhandenem Fehlerzustand geladen und ausgeführt werden. So kann eine Aktion, oder eine sinnvolle Verkettung von Operationen zum Abbruch des Prozesses eingeleitet werden. Nachdem der Abbruch durchgeführt wurde, wird die Steuerung in den Ausgangszustand versetzt.

Um festzulegen, bei welchen spezifischen Aufgaben der Systemstatus überprüft werden soll, wurde das Attribut „needConditionMonitoring“ zu den Jobeigenschaften hinzugefügt. Mit diesem Attribut kann angegeben werden, welches der vorhandenen Module für eine Überprüfung zur Ausführung eines Jobs relevant ist

Nach der Beschreibung der einzelnen Systemkomponenten werden nun die Datenhaltung, die Schnittstellen und der Datenaustausch zwischen den Teilkomponenten und innerhalb der Systeme dargestellt.

6.6.4 Datenhaltung, Schnittstellen und Datenaustausch

Innerhalb dieses Kapitels wird zunächst ein Überblick über die Datenflüsse innerhalb des Systems gegeben. Im Anschluss wird die Datenhaltung in der Datenbank beschrieben. Dann werden zunächst die Kommunikation der Systembestandteile des CoRe-UI und nachfolgend die Kommunikation zwischen CoRe-UI und dem Steuerungskonzept dargestellt. Abschließend werden der Datenfluss im Steuerungskonzept und die Kommunikation zwischen den einzelnen Modulen gezeigt.

Datenflüsse im Überblick

Zur Kommunikation der einzelnen Systembestandteile wird ein übergreifendes Datenmodell verwendet, welches auf den in Kapitel 6.2 und 6.3 beschriebenen Prinzipien

der Work List und der Modularisierung aufbaut. Der Datenaustausch innerhalb des Systems ist in Abbildung 6.23 dargestellt:

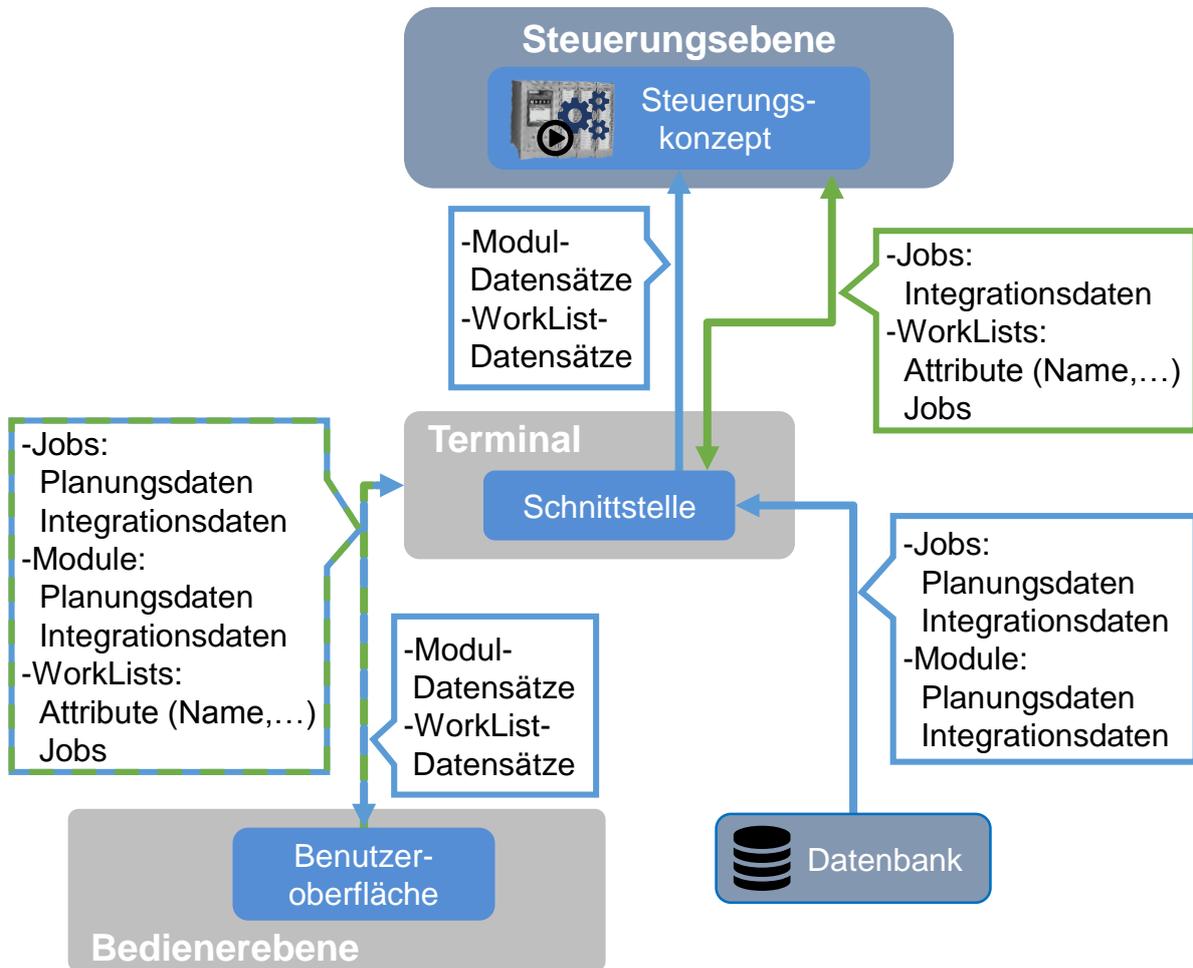


Abbildung 6.23: Austausch von Daten innerhalb des CoRe-UI

Wie in Abbildung 6.23 zu sehen, ist die Konsistenz des Datenmodells entscheidend, da viele Daten (bspw. Jobs, Work Lists) für mehrere Funktionalitäten genutzt werden. Es ergeben sich zwei wesentliche Datenflüsse innerhalb des Systems:

- Verbindungen in blau: Datenflüsse zur Konfiguration und Integration
- Verbindungen in grün: Datenflüsse zur Inbetriebnahme und Prozessdarstellung

Um die Work List zu erstellen und die Modulkonfiguration durchführen zu können, werden die verfügbaren Jobs und Modulausprägungen aus der Datenbank extrahiert. Innerhalb der Benutzeroberfläche werden die Planungsschritte durchgeführt und Datensätze zur Integration in das Steuerungskonzept erzeugt. Um Funktionen zu realisieren, welche zur Laufzeit mit der Steuerung interagieren, müssen Daten vom Steuerungskonzept an die Benutzeroberfläche gesendet werden. Wurden diese Daten in der Benutzeroberfläche bearbeitet, bspw. zur Anlagenrekonfiguration, werden die Daten über die gleiche Schnittstelle wieder an das Steuerungskonzept übertragen. Ebenso werden die Daten zur Prozessführung und Übersicht während des Prozesses fortlaufend an die Oberfläche gesendet. Zusätzlich zu diesen externen Schnittstellen

und Datenflüssen existieren Schnittstellen innerhalb des Systems, welche in diesem Kapitel ebenfalls beschrieben werden.

Datenhaltung

Wie in Abbildung 6.23 gezeigt werden die Datenobjekte der Work List, der Jobs und der Modulausprägungen von mehreren Funktionen und Teilsystemen zu unterschiedlichen Zeitpunkten verwendet. Für die Realisierung dieser Aufgabe bietet sich ein Datenmodell an, in welchem die entsprechenden Objekte zur Beschreibung von Betriebsmitteln und Diensten zentral archiviert werden. Dies stellt eine Konsistenz der Daten sicher. Die Grundstruktur ist entsprechend den in Kapitel 6.2 und 6.3 beschriebenen Prinzipien der Work List und des Modularisierungskonzeptes aufgebaut und der Struktur beschrieben im Zuge des Steuerungskonzeptes in Kapitel 6.6.3.

Um eine Identifikation innerhalb aller Systemteile und die Zuordnung zwischen Job und Modulausprägung zu ermöglichen, wird die Capability und der Name der Objekte genutzt. Um spezifische Beschreibungen und Anmerkungen hinzufügen zu können, verfügen die Elemente über eine Beschreibung („description“).

Zur Nutzung innerhalb des Systems werden die beschriebenen Jobs und Modulausprägungen in einer Datenbank katalogisiert und verwaltet. Eine solche Datenbank wurde über Excel abgebildet. Der Aufbau einer Modulausprägung und das entsprechend generierte Datenobjekt sind in Abbildung 6.24 dargestellt.

Module		
name	UR10	
capability	move	
description	HRC capable	
type	Robot System	
key	value	type
set_speed	500	number
set_acceleration	1	number
eth_ip	192.168.1.1	string
eth_port	6000	number
max_speed	1500	number
max_acceleration	3	number
range	1300	number
payload	10	number



Module: Robot System

name: UR10
 capability = move
 description= HRC capable
 type = Robot
 set_speed = 1500
 set_acceleration = 3
 eth_ip = 192.168.1.1
 eth_port = 6000
 ...

Abbildung 6.24: Modulausprägung in der Datenbank und generiertes Datenobjekt

Die Modulausprägungen, in diesem Beispiel ein Roboter vom Typ UR 10 werden in der Datenbank angelegt und entsprechend ihrer charakteristischen Attribute (Siehe Kap 6.3 und 6.4) beschrieben.

Die Beschreibung lässt sich in drei Teilbereiche untergliedern:

- Grauer Bereich: Allgemeine Kategorisierung nach Name, Capability, Beschreibung und Typ
- Grüner Bereich: Angabe der controlAttributes, welche bei der Implementierung und der Prozessdurchführung zur Kommunikation und Ausführung der Methoden gebraucht werden.
- Blauer Bereich: Angabe der planAttributes, welche zur Planung und Konfiguration der Modulausprägung genutzt werden. Diese werden nicht innerhalb der Steuerung verwendet.

Aus diesen Daten kann ein Datenobjekt generiert werden, welches die Eigenschaften eines Moduls abbildet. Soll eine neue Modulausprägung der Datenbank hinzugefügt werden, muss der Datenbank ein neuer Header, beginnend mit dem Bezeichner „Module“, wie in Abbildung 6.24 gezeigt, eingefügt werden. Der graue Bereich der Kategorisierung muss verpflichtend angegeben werden. Die planAttributes können für eine Modulkategorie beliebig festgelegt und erweitert werden, zusätzlich können bei Bedarf spezifische Beschreibungsattribute hinzugefügt werden. Für die Generierung eines Bausteins und der Steuerungsintegration sind je nach Kommunikationsart Spezifikationen notwendig, in diesem Beispiel IP und Port zur Kommunikation über ein auf Ethernet TCP/IP aufbauendes Protokoll.

Zum Abruf der Daten aus der Datenbank und der Kommunikation der Teilsysteme wird nun die Schnittstelle innerhalb des Terminals des CoRe-UI beschrieben.

Zentrale Schnittstelle im Terminal des CoRe-UI

Zentraler Aspekt bei der Nutzung des Systems ist die Datenhaltung und der Datenaustausch. Hierzu sollen alle verwendeten Datensätze an einer Stelle zusammengetragen und durch eine Schnittstelle zur Verfügung gestellt werden. In obiger Abbildung 6.23 wird deutlich, dass zwei wesentliche Datenquellen existieren. Vorhandene, also archivierte Modulausprägungen und Jobs werden in einer Datenbank gespeichert, Daten zur Rekonfiguration und Prozessübersicht stammen aus der Steuerung. Die Daten dieser beiden Quellen werden in einer zentralen Stelle gesammelt zusammengeführt und den Systemteilnehmern bereitgestellt. Die Struktur ist in Abbildung 6.25 gezeigt.

Ebenso können gesammelte Prozessdaten aus der Steuerung in das Terminal übertragen werden. Hierzu werden von der Steuerung Nachrichten an das Terminal gesendet, welche die benötigten Prozessgrößen enthalten. Diese können individuell konfiguriert werden. Beispielweise besteht die Möglichkeit nach einer durchgeführten Verschraubung die Schraubparameter und die Schraubposition an das Terminal zu übermitteln. Die somit vorhandenen Prozessgrößen können für den Mitarbeiter im Prozess Monitor visualisiert werden, um eine Information über den Prozesszustand zu geben oder an anderer Stelle wieder aufgerufen werden, um eine gezielte Nacharbeit zu ermöglichen. Ebenso können die gesammelten Prozessdaten gespeichert werden und stehen für eine nachgelagerte Verarbeitung zur Verfügung (z.B. für detailliertere Analysen oder zur Nutzung als Qualitätsdaten)

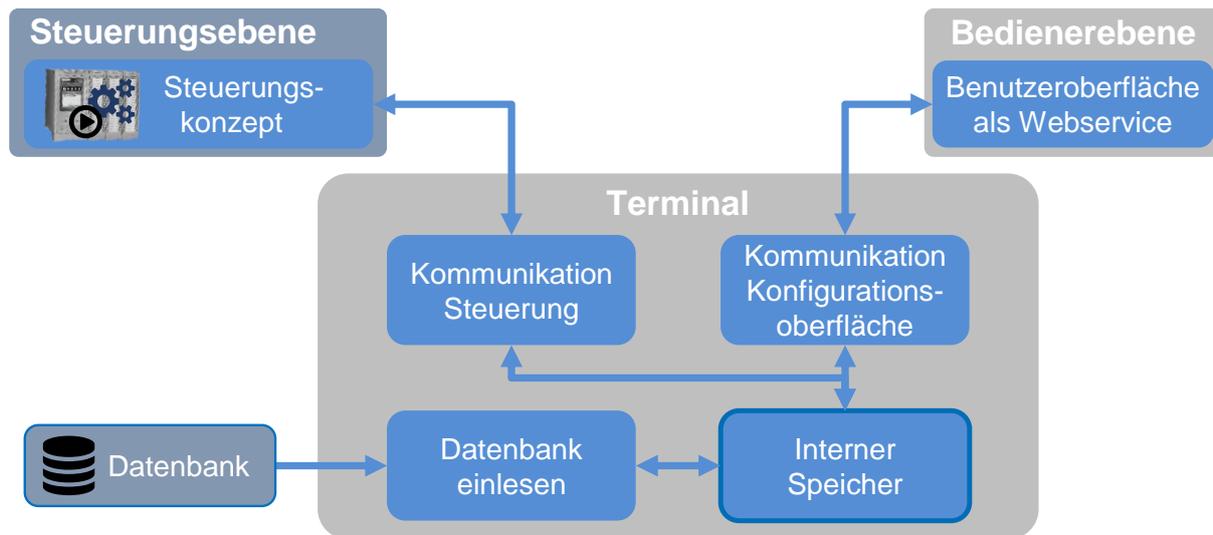


Abbildung 6.25: Datenschnittstellen innerhalb des CoRe-UI

Innerhalb des gezeigten Terminals werden die Informationen eingelesen und können an das Steuerungskonzept und die Benutzeroberfläche weitergegeben werden. Die Schnittstellen zur Benutzeroberfläche und zur Steuerung sind bidirektional implementiert, die Schnittstelle zur Datenbank nur als lesend.

Das Terminal agiert also als zentrale Kommunikationsstelle. Hierzu existiert ein interner Speicher. In diesen Speicher werden die Daten der Datenbank eingelesen, und die Benutzereingaben zwischengespeichert. Auch die auf der Steuerung vorhandenen Work Lists und Jobs werden hier eingelesen und abgelegt. Alle erzeugten Ergebnisse der Konfigurationsschritte werden über das Terminal zunächst abgerufen und nach der Bearbeitung an dieses gesendet. Ebenso verhält es sich mit der Übertragung von Daten zur und von der Steuerung.

Im Folgenden werden die Schnittstellen und der Datenaustausch zur Benutzeroberfläche und dem Steuerungskonzept beschrieben.

Schnittstelle des Terminals zur Benutzeroberfläche

Die Benutzeroberfläche stellt, wie bereits zuvor in Kapitel 6.6.1 beschrieben, einen Server zur Verfügung, welcher die Daten als Website für den Aufruf bereitstellt. Jeder Nutzer, der diese Website aufruft, kann die Daten verwenden. Zusätzlich wird der Website bei Aufruf über ein Endgerät eine Verbindungsmöglichkeit gegeben, um Daten vom Terminal zu beziehen. Zur Gestaltung einer übertragbaren Schnittstelle und der Ermöglichung der Datennutzung von mehreren Endgeräten wurde ein gRPC-Client integriert. gRPC stellt ein remote procedure calling Framework zur Verfügung. Hierbei werden in einer Datei Funktionen und Datentypen system- und programmiersprachenunabhängig beschrieben. Diese Datei liegt zur Spezifizierung der Kommunikation dem Server und dem Client vor. Durch eine serverseitige Implementierung dieser spezifizierten Schnittstelle kann eine Übertragung mit den entsprechenden generierten Clients stattfinden. Bei der Übertragung werden die Daten in folgenden Objekten übertragen:

- Info: Zusammenfassung des Zustandes der Steuerung, inklusive aller geladenen Work Lists und verfügbaren Dienste.
- Work Lists: Übermittlung aller auf der Steuerung gespeicherten Work Lists
- Modules: Eine Liste aller aus der Datenbank geladenen Modulausprägungen
- Jobs: Eine Liste aller aus der Datenbank geladenen Dienste

Schnittstelle zur Steuerung

Die innerhalb des Steuerungskonzeptes genutzte speicherprogrammierbare Steuerung arbeitet zyklisch. Zur Kommunikation mit der Steuerung muss daher eine Schnittstelle definiert werden, welche auf Grundlage vorhandener Befehle des Steuerungskonzeptes mit der Steuerung kommunizieren kann und diese zyklisch aufruft. Hierzu werden Events genutzt, welche eine Weiterschaltung in der Funktion beim Empfangen einer Nachricht bewirken. Zur Kommunikation werden die Befehle des Steuerungskonzeptes verwendet. Beispielsweise kann die Anzahl der verfügbaren Dienste übermittelt werden. Diese Informationen werden für spätere Operationen im internen Speicher des Terminals gespeichert. Eine Übersicht der Befehle ist im Anhang I angegeben.

Generierung der Datensätze

Nach Abschluss der Konfiguration sollen Datensätze zur Übertragung und Integration in das Steuerungskonzept erzeugt werden. Dies kann über die Import-Funktion der Programmieroberfläche der Steuerung, in diesem Fall des TIA-Portals, durchgeführt werden. Mit dieser Funktion lassen sich Bausteine als Textbausteine beschreiben und importieren. Um diese Bausteine außerhalb des TIA-Portals zu erstellen, wird eine Template basierte Quelltexterstellung genutzt. Hierbei werden die verschiedenen modulklassenspezifischen Bausteine hinterlegt und die zu nutzenden Parameter durch die Konfigurationsoberfläche eingefügt

Schnittstellen innerhalb des Steuerungskonzeptes

Zur Kommunikation der Betriebsmittel (Modulausprägungen) mit der Steuerung werden neben analogen und digitalen Eingängen ein Ethernet-Interface genutzt. Mit Hilfe dieses Ethernet-Interfaces kann die Kommunikation über eine TCP-IP Verbindung ermöglicht werden. Die Verbindung eines Ethernet-Interfaces wird über die Angabe von Verbindungsparametern spezifiziert, hierzu zählen IP-Adresse und Port-Nummer. Um sicherheitskritische Daten wie bspw. Roboterfahrbefehle zu senden kann ein spezieller Sende-Algorithmus genutzt werden. Die übermittelten Daten werden hierbei vom Empfänger interpretiert und die interpretierten Daten im Anschluss zur Steuerung in einer identischen Sequenz zurückgesendet. Es erfolgt ein Abgleich und nur wenn die Daten identisch sind, wird der entsprechende Job freigegeben. Zusätzlich kann eine Obergrenze für die Dauer eines Kommunikationsschrittes festgelegt werden. Für echtzeitkritische Kommunikation können zudem die ohnehin schon verfügbaren Kommunikationskanäle der Steuerung wie ProfiNet oder ProfiBus verwendet werden.

Modulausprägungen, welche über externe Steuerungen verfügen (bspw. Roboter), müssen durch das Steuerungskonzept zur Ausführung von Diensten angesprochen werden. Hierzu kann die Klasse des Ethernet-Interfaces genutzt werden. Externe Steuerungen müssen hierfür über eine definierte Routine verfügen, welche die Eingaben des Steuerungskonzeptes umsetzen kann. Diese Routinen werden, wie bereits in Kapitel 6.5.2 beschrieben, als Applikationen bezeichnet. Sie stellen eine Austauschbarkeit der entsprechenden Modulausprägung sicher, da die Kommunikation zwischen dem Steuerungskonzept und der Applikation standardisiert abläuft. Bei der erstmaligen Nutzung einer Modulausprägung müssen auf dessen Steuerung die Verknüpfung der aufgerufenen Dienste mit der Methodenausführung durch die Steuerung implementiert werden.

Dies lässt sich am Beispiel eines Roboters verdeutlichen. Zur Durchführung von Bewegungsabläufen mittels Roboter muss der externen Robotersteuerung ein entsprechender Datensatz mit Bewegungsdaten übermittelt werden. Dieser Datensatz wird innerhalb des Steuerungskonzeptes modulunabhängig aus den vorliegenden Jobs generiert. Wurde ein solcher Bewegungssatz erstellt und an eine Robotersteuerung gesendet, muss die Steuerung den Datensatz verarbeiten und eine entsprechende Antwort an das Steuerungskonzept zurücksenden können. Hierzu ist auf jeder externen Steuerung eine Standardroutine implementiert, welche die Datensätze des Steuerungskonzeptes entsprechend verarbeiten und definierte Antworten senden kann. Durch die Nutzung solcher Standardroutinen auf externen Steuerungen, kann eine konsistente, herstellerunabhängige Nutzung von Modulen garantiert werden.

Modulausprägungen welche keine Ethernet Anbindung unterstützen, können durch individuelle Anpassungen genutzt werden. Auch die Steuerungen dieser Module müssen dann über eine Routine verfügen, welche die übermittelten Befehle des Steuerungskonzeptes mit der externen Steuerung verknüpft. Einfaches Beispiel ist eine Routine, welche über die digitalen Eingänge der externen Modulsteuerungen angesprochen werden kann.

Schnittstelle zur Übertragung von Positionen und Koordinaten

Innerhalb der Erstellung der Work List verfügt jeder Bewegungsbefehl innerhalb der Job Properties über die Möglichkeit einer Angabe von Koordinaten (Abbildung 6.26). Diese Schnittstelle kann auf mehrere Arten genutzt werden um Positionsdaten an das Steuerungskonzept übermitteln zu können.

Abbildung 6.26: Eingabe der Koordinaten bei den Job-Properties

Bisher umgesetzte Möglichkeiten:

- Manuelle Eingabe der Koordinaten.
- Konfiguration der Koordinaten in der Prozessübersicht oder der Inbetriebnahmefunktion des CoRe-UI.
- Importieren der Koordinaten aus einer Datenbank. Diese Datenbank kann durch Export der Positionen aus Konstruktions- und Simulationsprogrammen gefüllt werden.
- Übertragen der Koordinaten aus der Robotersteuerung. Über eine Teach App auf der Robotersteuerung können die Positionen mit dem Roboter angefahren werden und im Anschluss an das Steuerungskonzept übertragen werden.

6.7 Zusammenfassung

Innerhalb dieses Kapitels wurden die wichtigsten Schritte der Methodik beschrieben. Es wurde gezeigt, wie durch das Konfigurations- und Integrationskonzept eine Durchgängigkeit in der Planung ausgehend von der Prozessplanung zur technischen Umsetzung erreicht werden kann. Der Aufbau der Work List und das Modularisierungskonzept wurde vorgestellt und wie darauf basierend eine Modulkonfiguration durchgeführt wird. Der Integrationsprozess ist beschrieben worden und die Umsetzung der steuerungstechnischen Abbildung der Anlagentopologie wurde gezeigt.

Innerhalb der Darstellung der Systemelemente wurde der Aufbau des Gesamtsystems bestehend aus dem Steuerungskonzept und dem CoRe-UI beschrieben. Dargestellt worden ist, wie eine Umsetzung der Anlage durch die Konfigurationssoftware unterstützt wird und eine Planung und Integration ohne tiefgreifende Programmierkenntnisse durchgeführt werden kann. Hierzu ist beschrieben worden, wie auf Grundlage der Work List und des Modularisierungskonzeptes ein einheitliches Datenmodell aufgebaut wurde, welches von den Systemelementen genutzt werden kann. Der Gesamtprozess der softwareunterstützten Work List Erstellung und Modulkonfiguration und die Integration der Komponenten wurden erläutert. Ebenso erfolgt eine Beschreibung wie das entsprechende Steuerungskonzept aufgebaut ist und wie die Prozessausführung realisiert wurde. Die weiteren Teilbereiche des CoRe-UI zur Inbetriebnahme und Tests sowie der Prozessführung wurden dargestellt. Als abschließende Beschreibung erfolgt

die Darstellung der benötigten Konzepte zur Datenhaltung dem Datenaustausch und den Schnittstellen.

Ermöglichung der Wandlungsbefähiger

Durch den Gesamtablauf der modularen Konfiguration und Integration werden innerhalb der Anlage die in Kap. 2.1.1 beschriebenen Wandlungsbefähiger ermöglicht.

Das modulare Konzept und die zweistufige Planung über einen lösungsneutralen Systementwurf zur technischen Realisierung stellt die Modularität und Universalität sicher. Das System ist anpassungsfähig hinsichtlich neuer zu produzierender Produkte und neue Technologien können integriert werden. Der modulare Baukasten bietet abgeschlossene in sich funktionsfähige und getestete Einheiten welche ausgetauscht und wiederverwendet werden können.

Die Skalierbarkeit des Systems ist ebenfalls dadurch gegeben, dass einzelne Module ausgetauscht und die Aufgaben flexibel angepasst werden können. Dies ermöglicht einen angepassten Automatisierungsgrad über den Lebenszyklus der Produktionsanlage bzw. des produzierten Produktes.

Das System ist bewusst offen für alle Schnittstellen und ermöglicht so eine breite Kompatibilität. Geräteunabhängige Applikationen und Kommunikationsmodule sollen einen minimalen Änderungsaufwand sicherstellen und den Programmieraufwand reduzieren.

Mobilität im Sinne der Übertragbarkeit des Konzeptes auf weitere Anwendungsfälle und veränderte Montageanlagen wird ermöglicht, indem gängige Steuerungssysteme und eine Vielzahl unterschiedlicher Betriebsmittel genutzt werden können. Durch die wiederverwendbaren und anpassungsfähigen Module können bestehende Applikationen einfach auf weitere Standorte übertragen und angepasst werden.

Zusätzlich zu den Wandlungsbefähigern wurde Rekonfigurierbarkeit innerhalb der Anlagensteuerung sichergestellt. Sowohl die durchzuführende Aufgabe kann durch eine geänderte Work List angepasst werden als auch die Anlagentopologie durch Austausch einzelner Module. Die Steuerung verfügt über die Möglichkeit zur Selbstidentifikation der Konfiguration und dem Abgleich mit den geforderten Verantwortlichkeiten der Work List. Diese Mechanismen erleichtern und beschleunigen den Rekonfigurationsprozess.

Im nun folgenden Kapitel wird die Methodik an einem praktischen Umsetzungsbeispiel aus der Automobilmontage validiert.

7 Validierung anhand der MRK Unterbodenmontage

Um die Praxistauglichkeit und Anwendbarkeit der entwickelten Methodik zu prüfen, wird im Folgenden eine Validierung in einem realitätsnahen Szenario durchgeführt. Begonnen wird mit der Auswahl eines geeigneten Validierungsszenarios. Anschließend werden die einzelnen Teilschritte der Methodik anhand des gewählten Praxisbeispiels angewandt. Zusammengeführt werden die Planungsergebnisse in der Erprobung im Gesamtsystem, welche in einer Demonstratorfabrik durchgeführt wird. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse.

7.1 Validierungsszenario

7.1.1 Vorgehen zur Auswahl eines geeigneten Prozesses

Wie bereits in Kapitel 3.2.1 erwähnt, hat die Automobilindustrie großes Interesse MRK-Prozesse zukünftig vermehrt in der Produktion zu nutzen. Für die Mitarbeiter in der Montagelinie soll diese Technologie den Vorteil bringen, dass der Roboter unergonomische und repetitive Aufgaben übernimmt. Ziel ist die langfristige Gesundheit der Mitarbeiter durch Reduktion der körperlichen Beanspruchung und eine Steigerung der Mitarbeiterzufriedenheit und -motivation durch attraktivere Arbeitsumfänge.

Die Leistung und Effizienz soll durch die hybride Montageanlage verbessert werden, indem eine höhere Produktqualität und Produktivität erreicht wird. Die Prozesssicherheit wird durch Mitarbeiterassistenz und automatisierte Prozessabsicherung erhöht. Zusätzlich ergeben sich Vorteile durch eine erhöhte Flexibilität und Wandlungsfähigkeit im Vergleich zur Vollautomation.

Um Prozesse hinsichtlich ihres Potenzials zum Einsatz von MRK bewerten zu können, wurden in Kap. 5.4.2 grundlegende Prinzipien und eine Vorgehensweise dargestellt:

- Fähigkeitsbasierte Analysen auf Grundlage der durchzuführenden Aufgaben
- Bewertung der Qualitätsrelevanz der Tätigkeit
- Häufigkeit der Tätigkeit, bzw. liegt Tätigkeit variantenübergreifend vor
- Verfügbare Zeit und Arbeitsraum
- Ergonomieklassifizierung

Anhand der Potenzialanalyse wird eine Bewertung durchgeführt. Dies bietet die Grundlage, um Prozesse mit hohem Potenzial zur MRK Umsetzung zu identifizieren.

Bei Begehungen in Montagelinien wurden herstellerübergreifend Montageprozesse die in einer über Kopf Position durchgeführt werden müssen, als eines der größten Ergonomieprobleme identifiziert. Hierzu zählen die Montageumfänge am Fahrzeugunterboden, wo variantenübergreifend Verkleidungsteile, Leitungen oder Verschlussstopfen montiert werden. Die Komponenten haben einen Einfluss auf die Fahrzeugsicher-

heit, das akustische Verhalten und die Dichtigkeit des Fahrzeugs. Eine Übersicht gängiger Bauteile, welche am Fahrzeugunterboden montiert werden und eine räumliche Einordnung innerhalb der Montagelinie ist in Abbildung 7.1 dargestellt.

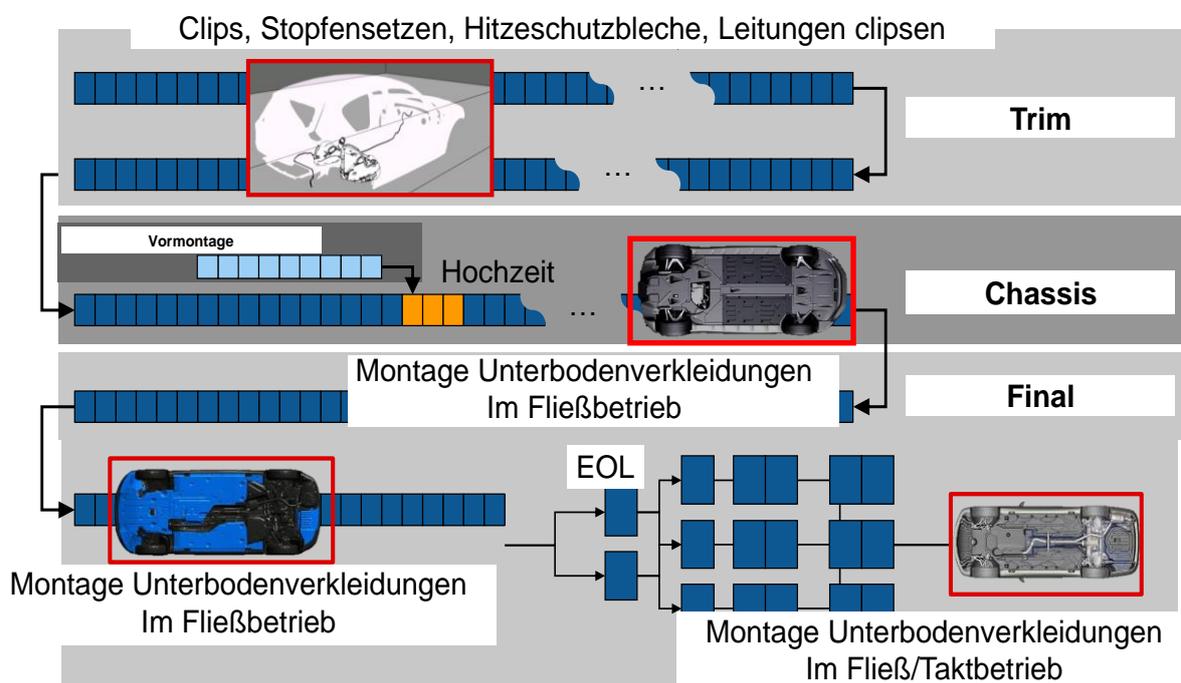


Abbildung 7.1: Bauteile der Unterbodenmontage und Verortung der Prozesse

Bei unterschiedlichen Herstellern gibt es verschiedene Verbauorte für die Verkleidungsteile am Unterboden. Zumeist werden sie im Bereich der Chassis und Final Linie angebracht. Diese Verortung innerhalb der Montagelinie ersetzt großteils die früher übliche Situierung im Anschluss an die End-of-Line Prüfstände.

Aufgrund der starken ergonomischen Belastung und des Fehlens einer Lösung zur Verbesserung wurde bei diesen Prozessen das größte Optimierungspotenzial festgestellt. Beispielhaft zur Validierung der Methodik wurde der Montageprozess der Unterbodenverkleidung (UBV) unterhalb des Motors ausgewählt, da hier durch die hohe Anzahl an Verschraubungen das höchste Verbesserungspotenzial festgestellt werden konnte. Der innerhalb der Validierung entwickelte Prozess befasst sich daher mit der Verschraubung dieser Verkleidung. Durchgeführt werden soll der Prozess unter den Randbedingungen einer Montagestation im Fließbetrieb. Eine Anforderung an die entwickelte Lösung ist durch Nutzung der Methodik die Flexibilität und Wandlungsfähigkeit in der Praxis darzustellen und eine einfache Übertragbarkeit auf andere Unterbodenmontageprozesse sicherstellen zu können. Im Folgenden wird die aktuelle Produktionssituation beschrieben.

7.1.2 Beschreibung der aktuellen Produktionssituation

Um positive Einflüsse hinsichtlich des cw-Wertes und der Geräuschentwicklung von Fahrzeugen zu erreichen, werden in zunehmendem Umfang Verkleidungsteile am Fahrzeugunterboden angebracht. Insbesondere die Verkleidung unterhalb des Motors weißt üblicherweise eine Vielzahl von Verschraubungen auf, die durch den Mitarbeiter

gesetzt werden müssen. In Abbildung 7.2 ist auf der linken Seite eine Verkleidung mit den Schraubpunkten zu sehen. Ein heute üblicher Montageprozess über Kopf oder in leicht seitlicher Lage ist auf der rechten Seite dargestellt.



Abbildung 7.2: Montageprozess der Unterbodenverkleidung [VOL16]

Im aktuellen Prozessablauf, dargestellt in Abbildung 7.2 – unten, entnimmt der Mitarbeiter das Verkleidungsteil aus der Materialbereitstellung und führt es dem Fahrzeug zu. Anschließend wird die Verkleidung durch Einschieben in die Frontschürze vorgefügt und so ausgerichtet, dass die Verschraubungsöffnungen der Verkleidung mit den Anbindungspunkten am Fahrzeugunterboden übereinstimmen. Danach wird die Verkleidung mit einzelnen Schrauben fixiert und im Anschluss die restlichen Schrauben gesetzt. Es sind in der Regel drei Mitarbeiter notwendig, um innerhalb eines Taktes (6 m Taktlänge, Taktzeit 60 s.) alle Verschraubungen durchzuführen. Der Schraubprozess wird bei jedem Fahrzeug in gleicher Art und Weise durchgeführt. Die Anzahl und die Lage der Schraubpunkte ändern sich variantenabhängig geringfügig. Durch die hohe ergonomische Belastung müssen die Mitarbeiter regelmäßig rotieren.

7.1.3 Ableiten von Optimierungspotenzial

Ergonomie

Wie bereits beschrieben, ist der Montageprozess über Kopf für den Mitarbeiter sehr belastend. In Abbildung 7.3 ist eine Prozessübersicht und eine Darstellung der Einzelaufgaben hinsichtlich zeitlichem Anteil und ergonomischer Belastung zu sehen.

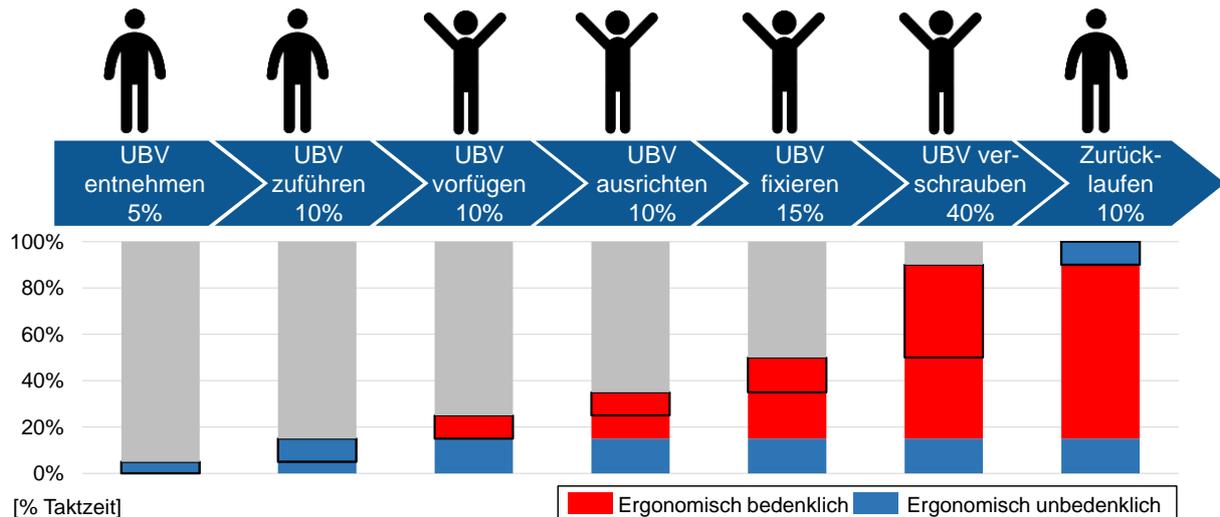


Abbildung 7.3: Die einzelnen Prozessschritte mit ergonomischer Belastung

Der Gesetzgeber gibt im Arbeitsschutzgesetz die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung von Arbeits- und Gesundheitsschutz vor. Die Berufsgenossenschaften als Versicherer fordern von den Arbeitgebern, dass Arbeitsplätze über eine Gefährdungsbeurteilung bewertet werden müssen. Die Gefährdungsbeurteilungen der einzelnen Berufsgenossenschaften basieren auf Vorgaben der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). Die BAuA stellt Methoden bereit, um ergonomische Aspekte der Gefährdungsbeurteilung zu bewerten und Defizite sowie Handlungsbedarfe zu erkennen. Die Bewertung des Prozesses wird mit der Leitmerkmalmethode (LMM) zur Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen durchgeführt. [LMM]

REBA (Rapid Entire Body Assessment) ist aufgrund seiner Einfachheit international in diversen Industrie- und Dienstleistungssektoren eines der verbreitetsten Ergonomiebewertungstools. Es können, mit wenig Aufwand und ohne notwendiges Vor- bzw. Fachwissen, Risiken von arbeitsbezogenen Muskel-Skelett-Erkrankungen in verschiedenen Arbeitshaltungen des kompletten Körpers abgeschätzt werden. [HIG00]

In Abbildung 7.4 sind Ausschnitte der Bewertung der Unterbodenverschraubung mit der LM-Methodik der BAuA und REBA dargestellt. Der Unterschied zwischen den Methoden liegt darin, dass REBA ausschließlich eine Beurteilung der Tätigkeiten an sich vornimmt. Die LMM bezieht Zeitgewichtungsfaktoren mit ein und berücksichtigt wie häufig und über welchen Zeitraum eine Tätigkeit ausgeführt wird.

Beide Methoden erzielen sehr ähnliche Ergebnisse. Die detaillierten Bewertungen sind im Anhang IV eingefügt.

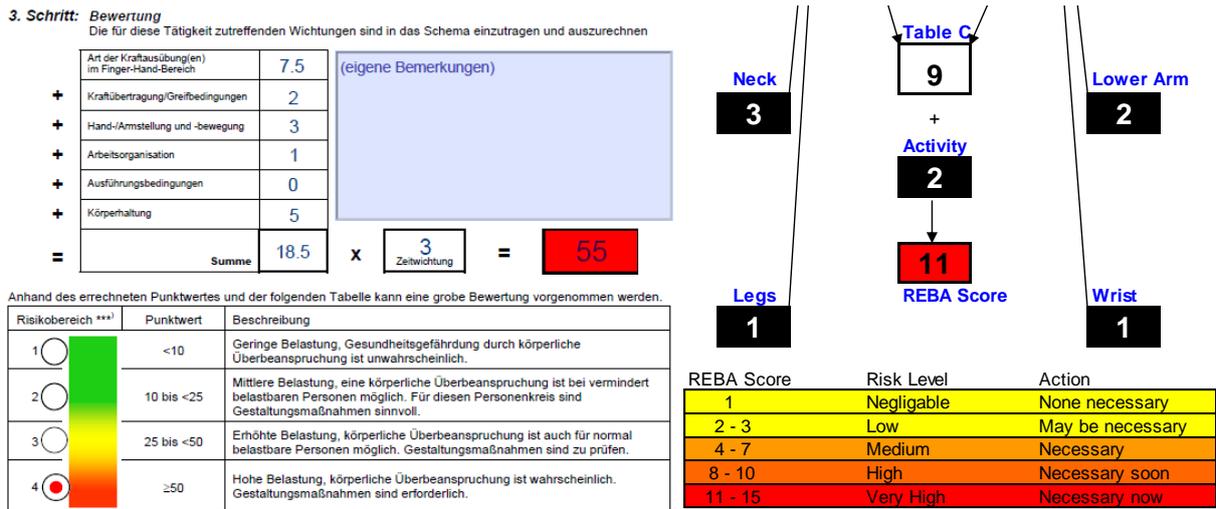


Abbildung 7.4: Ausschnitt aus der Ergonomiebewertung mit LMM und REBA

In beiden Bewertungsmethoden ist die Körperhaltung in Oberkörper und Armen, sowie die Halsbewegung für die hohe Risikobewertung ausschlaggebend. Mit einer Punktzahl von 55 bei der LMM und 11 bei REBA ist der Arbeitsplatz im Bereich einer hohen bis sehr hohen Gefährdungsstufe („Hohe Belastung“ bzw. „High Risk“) zu verorten. Beide Bewertungsmethoden geben vor, dass dringender Handlungsbedarf bzgl. der Arbeitsplatzgestaltung besteht.

Durch Nutzung einer Schwenkfunktion des Fahrzeuggehänges wie in Abbildung 7.2 auf der rechten Seite gezeigt, kann das Risikolevel etwas verringert werden, jedoch müssen weiterhin unergonomische Bewegungen durch den Mitarbeiter ausgeführt werden. Das höchste Optimierungspotenzial aus ergonomischer Sicht besteht also darin, die Prozessschritte, die eine hohe Punktzahl verursachen zu analysieren und den Mitarbeiter so weit wie möglich von diesen zu entlasten. Als Ergebnis soll der Zeitanteil unergonomischer Einzelaufgaben am Gesamtprozess für den Mitarbeiter bestmöglich reduziert werden.

Qualität und Produktivität

Durch die hohe Anzahl der Verschraubungen, welche stets in gleicher Form durchzuführen sind, ist der Arbeitsablauf für den Mitarbeiter sehr monoton und dadurch fehleranfällig. Der heutige Prozess benötigt eine sehr hohe manuelle Montagezeit, zur Montage der aller Verkleidungsteile am Unterboden (Vgl. Abbildung 7.5) werden bis zu 8 Mitarbeiter eingesetzt. Durch eine Teilautomatisierung kann manuelle Arbeitszeit eingespart und das Qualitätsniveau gesteigert werden.

Im Folgenden werden die Teilprozessschritte detailliert auf ihr Optimierungspotenzial untersucht.

Optimierungspotenzial der Teilprozessschritte

Der Prozess kann wie in Abbildung 7.2 dargestellt in Zuführen und Vorfügen der Verkleidung sowie den Schraubprozess unterteilt werden.

Zuführen und Vorfügen:

Aufgrund der Eigenschaften der Verkleidung, welche aus einem Mischfaservlies besteht, ist sie relativ biegeschlaff und die Handhabung und Zuführung erfordert Geschicklichkeit und Anpassungsvermögen. Ebenso muss in der Materialzuführung variantenabhängig die passende Verkleidung entnommen werden.

Schraubprozess:

Die Lage der Schraubpunkte ändert sich zwar leicht abhängig von der Variante, wird jedoch mit gleichen Fügmitteln im gleichen Arbeitsraum gesetzt. Durch die hohe Zahl der Verschraubungen und die dabei einzunehmende ergonomisch schlechte Körperhaltung wird dieser Teilprozess als Hauptoptimierungspotenzial definiert.

Fazit

Montagevorgänge, welche am Fahrzeugunterboden durchgeführt werden müssen, sind wie beschrieben ergonomisch sehr kritisch. Ebenso besteht aufgrund der repetitiven Durchführung der Verschraubungs- und Befestigungsprozesse ein hohes Fehlerpotenzial. Bei diesem Teilprozess besteht somit aus zahlreichen Gründen Handlungsbedarf und ein hohes Optimierungspotenzial.

7.1.4 Bestimmung der relevanten Grobplanungsdaten

Montageort, -ablauf und Transportsystem

Die Montageumfänge zum Anbringen der Unterbodenverkleidung sind, wie in Abbildung 7.1 gezeigt, bei den meisten Herstellern am Ende der Chassis Linie oder vor dem Absetzen des Fahrzeuges im Final Bereich verortet. Als Transportsystem wird üblicherweise ein Gehängeförderer in Form einer Elektrohängebahn o.ä. eingesetzt. Das Fahrzeug wird entsprechend angehoben, um eine Zugänglichkeit zum Unterboden zu ermöglichen. Einige OEM verwenden schwenkbare Gehänge, um eine seitliche Zugänglichkeit zu gestatten. In seltenen Fällen erfolgt die Montage der Unterbodenverkleidungen erst nach der Inbetriebnahmelinie im End-of-Line Bereich. Hierbei werden die Verkleidungen von einem Mitarbeiter meistens in einer Grube am Fahrzeugunterboden montiert während das Fahrzeug auf einem Bodenfördersystem bewegt wird. Durchgeführt wird der Prozess hier entweder fließend oder getaktet.

Montagereihenfolge

Durch das Überlappen der Verkleidungsteile wird eine Reihenfolge vorgegeben, wie diese anzubringen sind. Nach dem Vorfügen der Verkleidungsteile können die Verschraubungen in beliebiger Reihenfolge, bei Bedarf auch von mehreren Mitarbeitern parallel gesetzt werden.

Materialbereitstellung

Die Verkleidungsteile werden in einem Materialbereitstellungswagen zur Verfügung gestellt. Je nach Antriebsart und Motorvariante sind die Verkleidungen leicht unterschiedlich. Fügmittel werden als Schüttgut bereitgestellt.

Zusammenfassung

Zur Validierung der Methodik wird der Prozess der Unterbodenmontage ausgewählt. Er vereint die folgenden Eigenschaften, welche eine angepasste Automation sinnvoll machen:

- Hohe Ergonomische Belastung der Mitarbeiter.
- Gesamtaufgabe umfasst Teilaufgaben unterschiedlicher Komplexität.
- Der Prozess ist qualitätsrelevant.
- Prozess wird mit leichten Unterschieden variantenübergreifend durchgeführt.
- Es besteht Rationalisierungspotenzial.
- Der Prozess enthält ergonomisch bedenkliche Teilumfänge.
- Durch die Verortung in der Fließmontagelinie ist die Umsetzung anspruchsvoll und bisher in der Praxis nicht gelöst.
- Es besteht Potenzial zur Übertragung der Technologie auf weitere Montageprozesse.

Zusätzlich zu den beschriebenen Punkten hinsichtlich der Praxisrelevanz und den erreichbaren Umsetzungspotenzialen ist der Prozess sehr gut zur praktischen Validierung der Methodik geeignet:

- Alle Schritte der Planungsmethodik können durchgeführt werden.
- Sinnvolle Aufgabenzuordnung und Automatisierungsgrad müssen bestimmt werden.
- Es werden alle beschriebenen Module des Baukastens benötigt.
- Automation wird bisher in der Unterbodenmontage nicht eingesetzt, Prozess ist daher komplett neu und wird von Grund auf entwickelt.

In den folgenden Kapiteln werden die Einzelschritte der Methodik durchgeführt und anschließend die praktische Umsetzung und Validierung in der Demonstratorfabrik beschrieben.

7.2 Produktmerkmalsanalyse

7.2.1 Produktmerkmalsanalyse der relevanten Komponenten

Am Unterboden von Fahrzeugen sind zahlreiche Verkleidungsteile angebracht. Eine beispielhafte Übersicht der verwendeten Verkleidungsteile, ist in Abbildung 7.5 dargestellt.

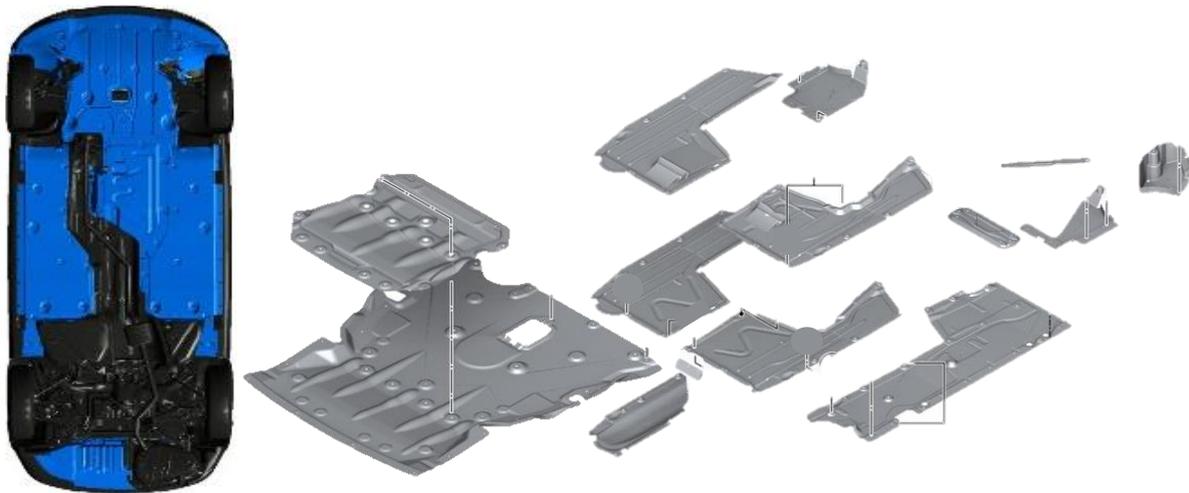


Abbildung 7.5: Übersicht der Verkleidungsteile am Fahrzeugunterboden

Die Produktanalyse wird im Folgenden anhand des im Validierungsszenario genutzten Beispielfahrzeugs durchgeführt. Die höchste Anzahl an Schraubpunkten, bei der genutzten Fahrzeugvariante 26, hat die Verkleidung unterhalb des Motors. Zur Validierung wurde daher dieses Teil ausgewählt. Die weiteren Verkleidungsteile am Unterboden bestehen aus dem gleichen Material und verfügen über die gleichen Fügeelemente, eine Übertragbarkeit ist daher gegeben. In Abbildung 7.6 ist die Verkleidung mit den markierten Schraubpunkten abgebildet.



Abbildung 7.6: Unterbodenverkleidung des Motors mit Schraubpunkten

Die Verkleidung besteht aus einem Mischfaservlies, ist formstabil, weist allerdings eine geringe Biegefestigkeit auf. Zum Ausgleich von Ungenauigkeiten beim Platzieren der Verkleidung sind, wie in Abbildung 7.6 auf der rechten Seite gezeigt, die Verschraubungsöffnungen ausreicht groß dimensioniert.

Zur Verschraubung werden Sechskantschrauben mit Blechschraubengewinde und einer unverlierbaren Unterlegscheibe genutzt. An den Anbindungspunkten am Fahr-

zeugunterboden sind zumeist C-Clip Muttern und an einigen Stellen Kunststoffspreizmuttern zur Aufnahme der Schrauben eingesetzt. Die Fügemitel und die gesamte Schraubverbindung sind in Abbildung 7.7 dargestellt.

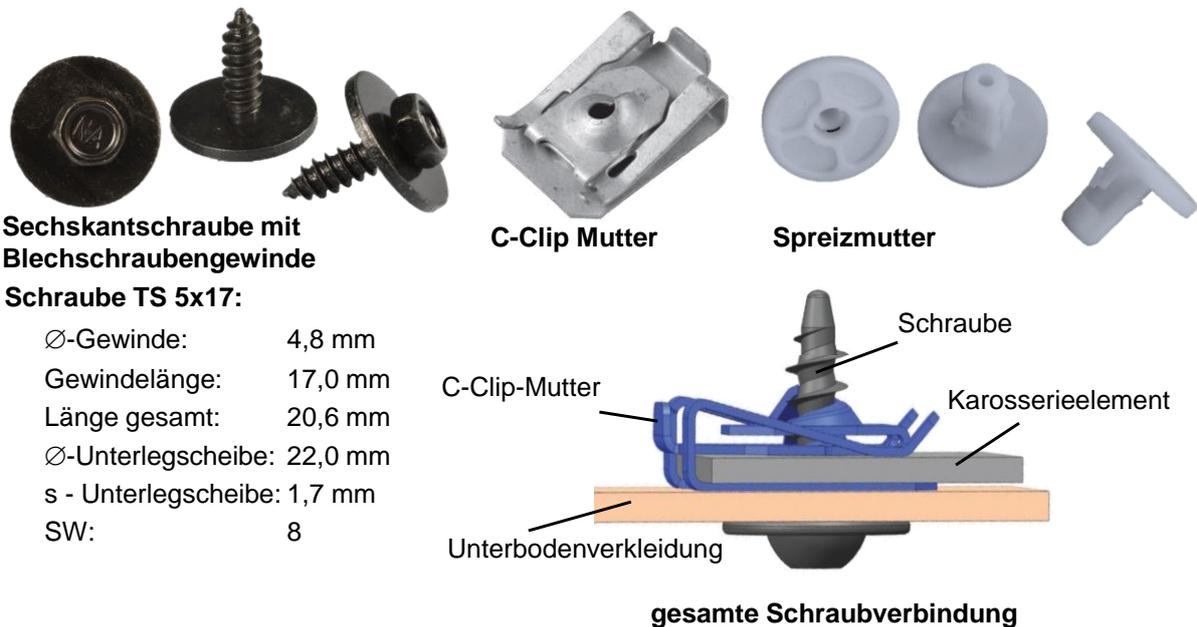


Abbildung 7.7: Fügemitel und Schraubverbindung der Unterbodenverkleidung

Anforderungen und Einflussgrößen an den Unterbodenschraubprozess

Zur Durchführung des Schraubprozesses ist im ersten Schritt die korrekte Ausrichtung der Verkleidung am Unterboden wichtig, um eine Überdeckung der Verschraubungsöffnungen der Verkleidung mit den Anbindungspunkten der Karosserie zu erreichen. Weiterhin muss sichergestellt sein, dass alle Schraubpunkte gesetzt werden und ein Drehmoment von 2,8 Nm erreicht wird.

7.2.2 Bestimmung der prozessrelevanten Hauptmerkmale

Die Strukturstückliste und der Strukturbaum für das ausgewählte Validierungsszenario der Montage der Unterbodenverkleidung unterhalb des Motors ist in Abbildung 7.8 gezeigt.

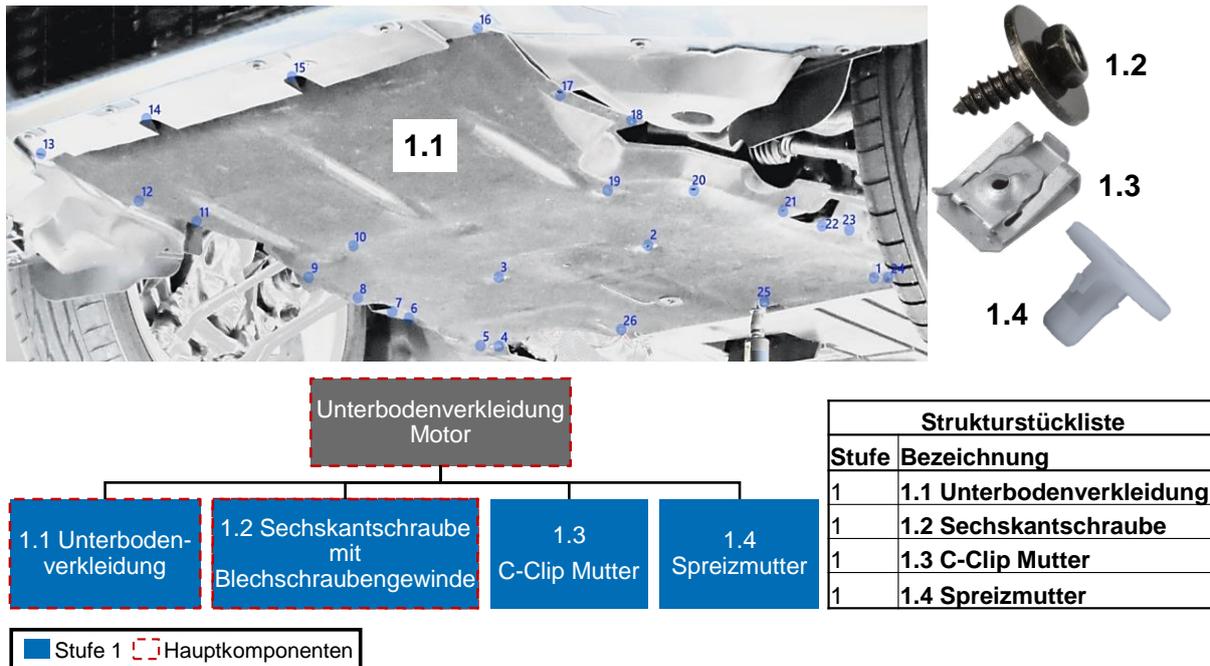


Abbildung 7.8: Strukturstückliste und der Strukturbaum der UBV-Motor

Am Fahrzeugunterboden werden zur Anbindung der Verschraubungen C-Clip Muttern (gelb) und Spreizmuttern (grün) genutzt, dargestellt in Abbildung 7.9.



Abbildung 7.9: Anbindungspunkte der UBV am Fahrzeugunterboden

Diese Verbindungselemente werden in vorgelagerten Montageprozessen angebracht oder sind bereits an den Bauteilen vormontiert. Im betrachteten Montageprozess wird daher die Verschraubung der Verkleidung an den bereits vorhandenen Anbindungspunkten betrachtet. Aus diesem Grund werden die Verkleidung und die Schrauben als Hauptkomponenten definiert. In Abbildung 7.10 ist die erweiterte Strukturstückliste dargestellt und die zu berücksichtigenden Merkmale und technische Parameter definiert.

Wichtig ist die korrekte Ausrichtung und Überdeckung der Anbindungsstellen und ein zu erreichendes Endmoment von 2,8 Nm.

Erweiterte Strukturstückliste			
Stufe	Bezeichnung	zu erfüllendes Merkmal	tech. Parameter
1	1.1 Unterbodenverkleidung	korrekte Ausrichtung und Überdeckung der Anbindungsstellen	
1	1.2 Sechskantschraube		2,8 Nm Anzugsmoment

Abbildung 7.10: Erweiterte Strukturstückliste

Innerhalb dieses Kapitels wurden im Zuge der durchgeführten Produktanalyse die Hauptkomponenten identifiziert, sowie ihre zu erfüllenden Merkmale und die technischen Parameter beschrieben. Diese Informationen werden im Folgenden genutzt, um einen Systementwurf eines optimierten Gesamtprozesses durchzuführen.

7.3 Systementwurf eines optimierten Gesamtprozesses

7.3.1 Definition und Beschreibung der Verantwortlichkeiten

Wie zuvor beschrieben wird im Validierungsszenario die Unterbodenmontage der Verkleidung unterhalb des Motors untersucht. Im ersten Schritt des Systementwurfes werden nun die zu erfüllenden Verantwortlichkeiten bestimmt. Hierzu wurde eine hierarchische Aufgabenanalyse durchgeführt. Das Ergebnis ist in einem Funktionsbaum in Abbildung 7.11 dargestellt.

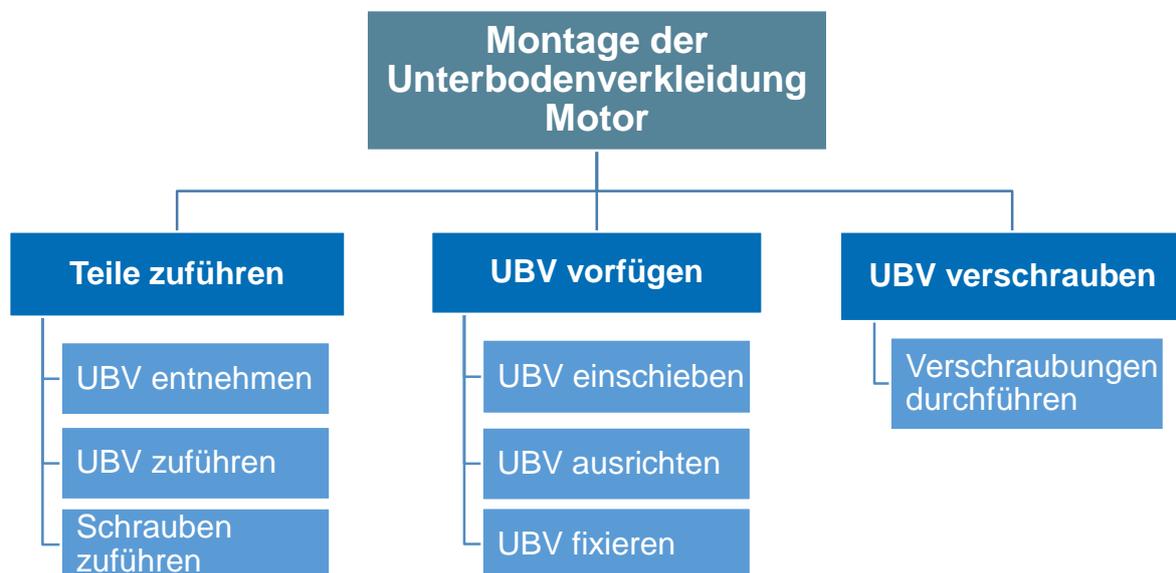


Abbildung 7.11: Funktionsbaum mit Verantwortlichkeitsstruktur

Die zu erfüllende Hauptverantwortlichkeit ist die korrekte Montage der Motor-Unterbodenverkleidung. Hierzu müssen drei Unterverantwortlichkeiten erfüllt werden:

- **Teile zuführen:** Die benötigten Teile müssen zum Fahrzeug zugeführt werden. Die Verkleidung muss aus der Materialzuführung entnommen und zum Fahrzeug gebracht werden. Ebenso müssen die Schrauben zugeführt und am Montageort bereitgestellt werden.

- **UBV vorfügen:** Um den Schraubprozess durchführen zu können, ist ein Vorfügen der Verkleidung notwendig. Die Verkleidung wird dazu in die Frontschürze eingeschoben. Es erfolgt eine Ausrichtung der Verkleidung, sodass die Anbindungspunkte der Karosserie mit den Verschraubungsöffnungen der Verkleidung übereinstimmen. Die Verkleidung wird mit 2-4 Schrauben so fixiert, dass kein Verschieben mehr möglich ist.
- **UBV verschrauben:** Die Schrauben der Verkleidung werden verschraubt.

Die definierten Verantwortlichkeiten ermöglichen eine lösungsneutrale Systembeschreibung. Diese wird nun im folgenden Schritt in die Prozessplanung überführt, um den Arbeitsablauf zu planen.

7.3.2 Prozessplanung

Planung des Arbeitsablaufs

Anhand der definierten Verantwortlichkeiten ist zur Planung des Prozessablaufes der in Abbildung 7.12 gezeigten Operationsreihenfolge mit Merkmalen erstellt worden.

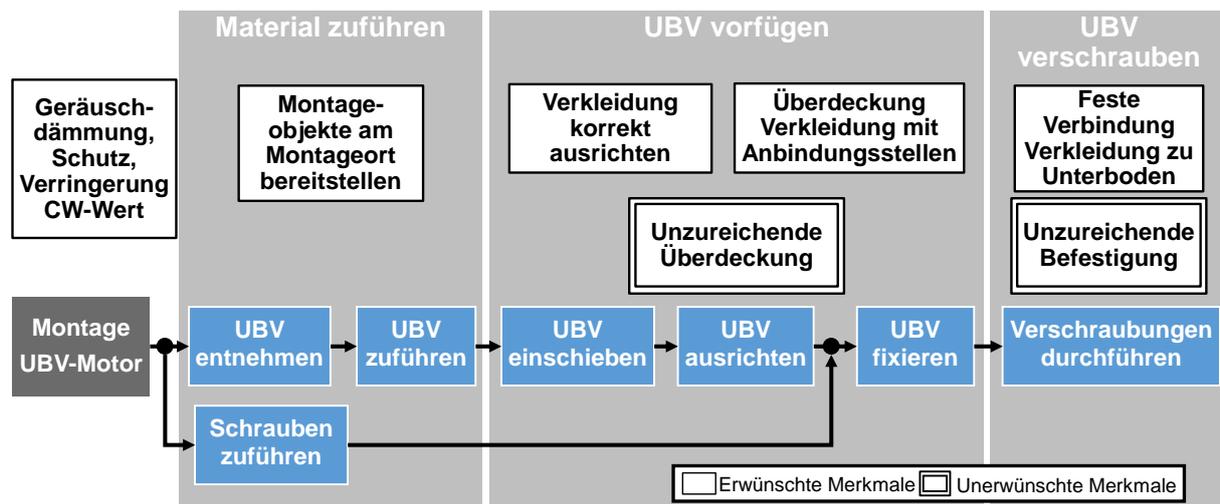


Abbildung 7.12: Operationsreihenfolge mit Merkmalen

Der Ablauf des Prozesses erfolgt gemäß der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Verantwortlichkeiten.

Der erste durchzuführende Schritt ist die Zuführung des Materials zum Montageprozess. Nun folgt das Vorfügen, hierbei ist zu beachten, dass die Ausrichtung korrekt erfolgt und die Überdeckung der Anbindungsstellen gegeben ist. Eine unzureichende Überdeckung ist zu vermeiden, ansonsten können einzelne Punkte nicht verschraubt werden. Im Anschluss wird die Verkleidung nach Zuführung der Schrauben fixiert. Danach folgt die Verschraubung an den restlichen Schraubpunkten, um eine feste Verbindung der Verkleidung zum Unterboden sicherzustellen.

Aufgabenteilung zwischen Mensch und automatisiertem System

Die Aufgabenteilung wird wie zuvor beschrieben anhand fähigkeits-, qualitäts-, varianten- und ergonomiebasierter Kriterien durchgeführt.

Das Ergebnis der Analyse ist in Abbildung 7.13 zu sehen.

Verantwortlichkeit	Erforderliche spezifische Fähigkeiten	Kognitions Level	Variantenabhängigkeit	Sicherheits/Qualitätsrelevanz	Ergonom. Belastung	Mögliche Zuordnung
Schrauben zuführen	Aufgabe geringer Komplexität, immer in gleicher Art auszuführen, keine komplexen Bewegungen oder Anpassungen nötig	gering	gering	gering	gering	automat.
UBV entnehmen	Aufgabe mittlerer Komplexität, unterschiedliche Varianten zu berücksichtigen	mittel	hoch	gering	gering	manuell
UBV zuführen	Aufgabe mittlerer Komplexität, Verkleidung biegeschlaff und große Abmessungen	mittel	gering	gering	gering	manuell
UBV einschieben	Aufgabe höherer Komplexität, Teilweise je nach Lage Ausgleichsbewegungen und Anpassungen nötig, um Verkanten zu verhindern	hoch	gering	gering	hoch	manuell
UBV ausrichten	Aufgabe höherer Komplexität, teilweise je nach Lage Ausgleichsbewegungen und Anpassungen nötig, um Überdeckung sicherstellen	hoch	mittel	mittel	hoch	manuell
UBV fixieren	Aufgabe mittlerer Komplexität, Anlage und fester Sitz der Verkleidung sicherstellen	mittel	gering	mittel	hoch	manuell
Verschraubung durchführen	Immer in gleicher Weise durchzuführen, gleichmäßiges Endmoment und Anlage sicherstellen	mittel	gering	hoch	hoch	automat.

Abbildung 7.13: Aufgabenteilung zwischen Mensch und automatisiertem System

Die Zuführung der Schrauben ist eine Aufgabe geringer Komplexität und aufgrund einheitlicher Schrauben immer in gleicher Art und Weise durchzuführen. Daher kann dieser Prozessschritt automatisiert durchgeführt werden.

Die Entnahme und die Zuführung der Verkleidung gestalten sich aufgrund unterschiedlicher Varianten und der großen Abmessungen, sowie der Biegeschlaffheit der Verkleidung als komplexerer Prozess, welcher sich schwer automatisieren lässt. Ebenso das Einschieben und Ausrichten der Verkleidung. Hier ist eine an die Situation angepasste Reaktion und Geschicklichkeit nötig, um Ausgleichsbewegungen und eine korrekte Ausrichtung zu ermöglichen. Das Fixieren der Verkleidung ist aufgrund der Biegeschlaffheit und der nötigen Ausrichtung ebenfalls schwer automatisierbar. Die Umfänge sind ergonomisch nachteilig, benötigen jedoch, verglichen mit dem Durchführen der Verschraubungen, eine kurze Montagezeit (siehe Abbildung 7.3).

Der Schraubprozess ist eine Tätigkeit, die immer in gleicher Weise durchgeführt wird. Variantenabhängig gibt es leichte Änderungen an der Lage der Schraubposition, diese befinden sich jedoch stets im gleichen Arbeitsraum. Aufgrund der Vielzahl der Schraubpunkte ist die Tätigkeit sehr repetitiv und einzelne Schraubpunkte können leicht vergessen werden. Zusätzlich weist die Tätigkeit eine hohe Qualitätsrelevanz auf, da die korrekte Durchführung der Verschraubung entscheidend für den Sitz und die Funktion der Verkleidung ist. Ebenfalls ist der Prozess ergonomisch sehr nachteilig und wird über einen Großteil der Montagezeit innerhalb der Station durchgeführt. Aufgrund dieser Punkte ist eine Automatisierung dieses Teilschrittes als sinnvoll anzusehen.

Im nächsten Abschnitt werden die Verantwortlichkeiten zugeordnet und ein Umsetzungsprozess definiert.

Beschreibung Umsetzungsprozess

Aufgrund der Analyse, dargestellt zuvor in Abbildung 7.13, kann eine Zuteilung der Verantwortlichkeiten zu Mensch und automatisiertem System vorgenommen werden.

Wie in Abbildung 7.14 gezeigt wird die Durchführung der Verschraubungen automatisiert durchgeführt, während das Zuführen und Vorfügen der Verkleidung durch den Mitarbeiter erledigt wird. Durch die Unterteilung von manuellem Vorfügen und automatisierter Verschraubung wird der Zuführprozess der Schrauben unterteilt. Die zum Vorfügen benötigten Schrauben werden vom Mitarbeiter mitgeführt. Die restlichen Schrauben werden automatisiert während des Schraubprozesses zugeführt.

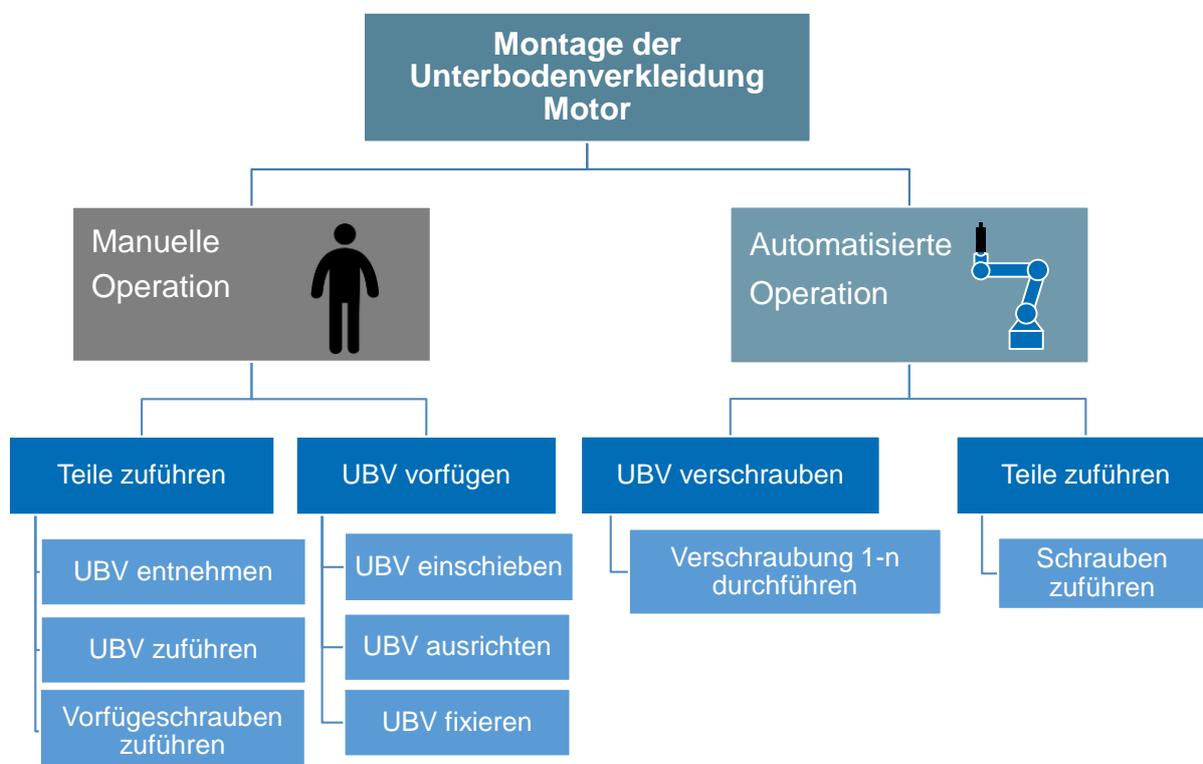


Abbildung 7.14: Verantwortlichkeitsstruktur mit Aufgabenzuordnung

Der prozedurale Ablauf des Prozesses ist in Abbildung 7.15 in einer Operationsreihenfolge gezeigt. Bis auf die Zuführprozesse der Schrauben laufen alle Prozesse sequentiell ab.

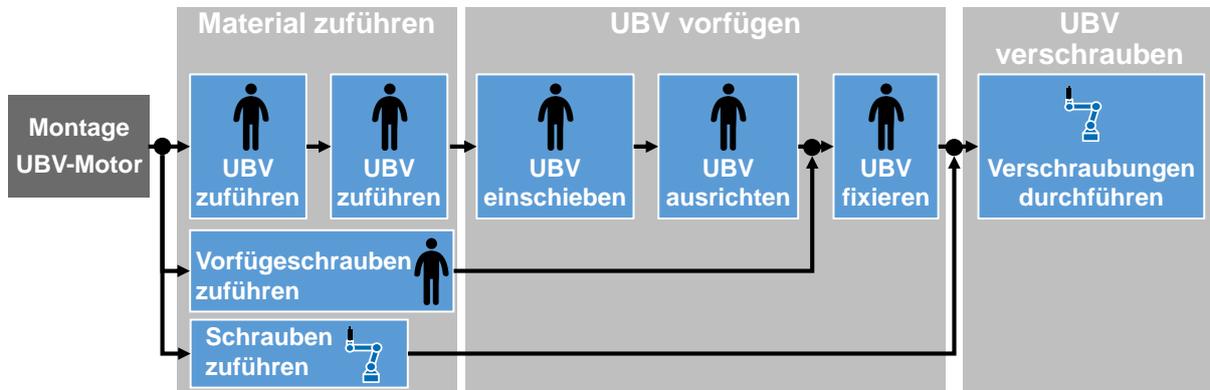


Abbildung 7.15: Operationsreihenfolge der Unterbodenverschraubung

Der detaillierte Ablauf des Gesamtprozesses unter Einbeziehung der konfigurierten Betriebsmittel mit zugehörigen Zeiten wird in Kapitel 7.4.3 beschrieben.

Durch diese Aufteilung lässt sich eine Verbesserung der Ergonomie des Arbeitsplatzes und manuelle Arbeitszeit einsparen. Zusätzlich können Fehler besser vermieden und die Prozessdaten automatisiert erfasst werden. In Abbildung 7.16 werden die Verbesserungspotenziale dargestellt.

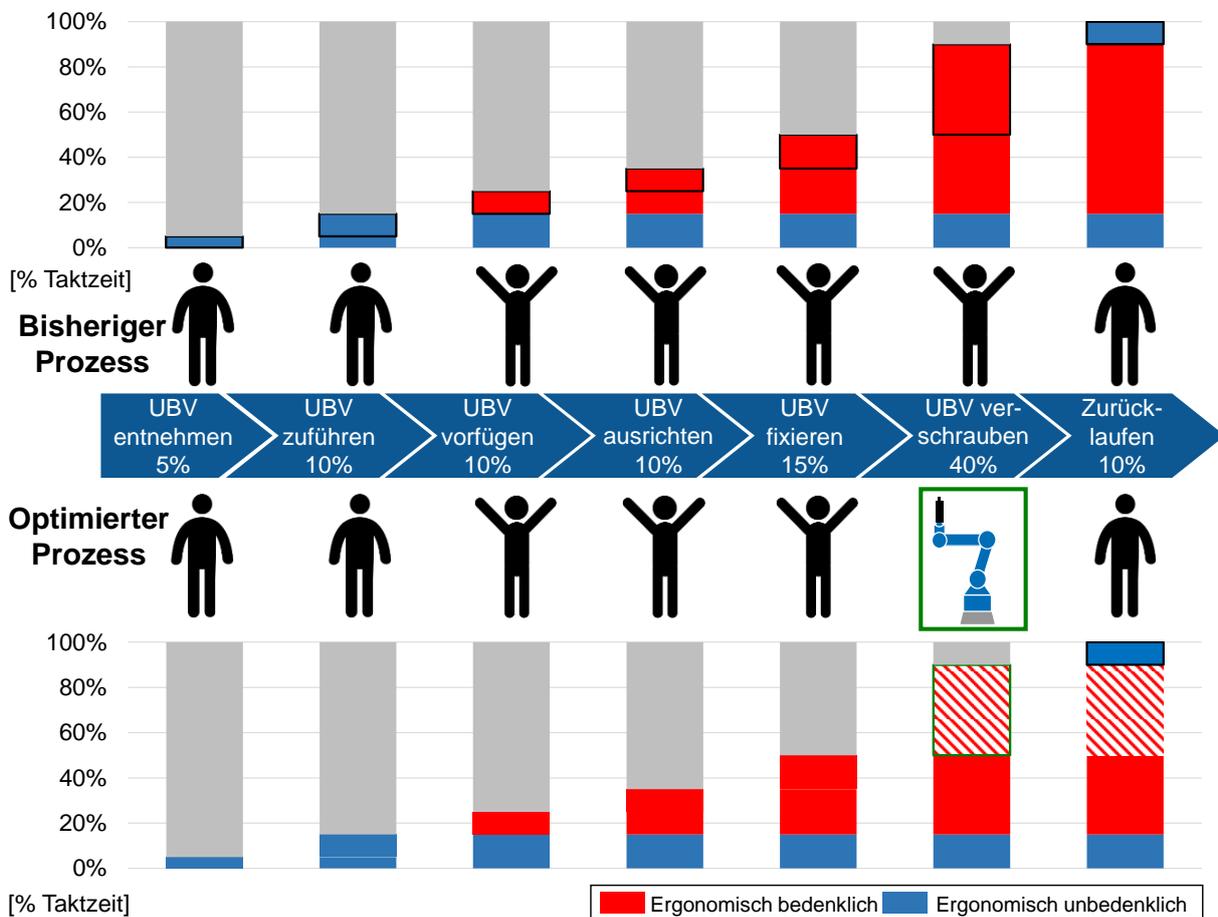


Abbildung 7.16: Verbesserungspotenziale durch optimierten Prozess

Ergonomische Verbesserung

Durch Übernahme des Schraubprozesses durch den Roboter lässt sich, wie in Abbildung 7.16 gezeigt, der ergonomisch bedenkliche Arbeitsumfang bei einem Mitarbeiter um über 50% reduzieren. Da üblicherweise bis zu drei Mitarbeitern eingesetzt werden, sind entsprechend Verbesserungen bei weiteren Mitarbeitern möglich.

In der Ergonomiebewertung führt diese Optimierung, wie in Abbildung 7.16 gezeigt, zu einer Reduktion um 32 Punkte und 2 komplette Risikostufen von Rot auf Grün in der kein akuter Handlungsbedarf mehr besteht. [LMM] Diese Reduktion ist im Wesentlichen auf eine Verringerung der Zeitgewichtung durch eine Verkürzung der über Kopf Tätigkeiten zurückzuführen. Einen weiteren Einfluss hat eine reduzierte Kraftausübung im Handbereich durch die Abnahme der durchzuführenden Verschraubungen. Zusätzlich ergibt sich durch den reduzierten über Kopf Anteil eine verbesserte Einstufung der Körperhaltung, da – anstatt ständig – nur noch – häufig – über Schulterhöhe gegriffen werden muss. Die komplette Bewertung ist im Anhang IV eingefügt.

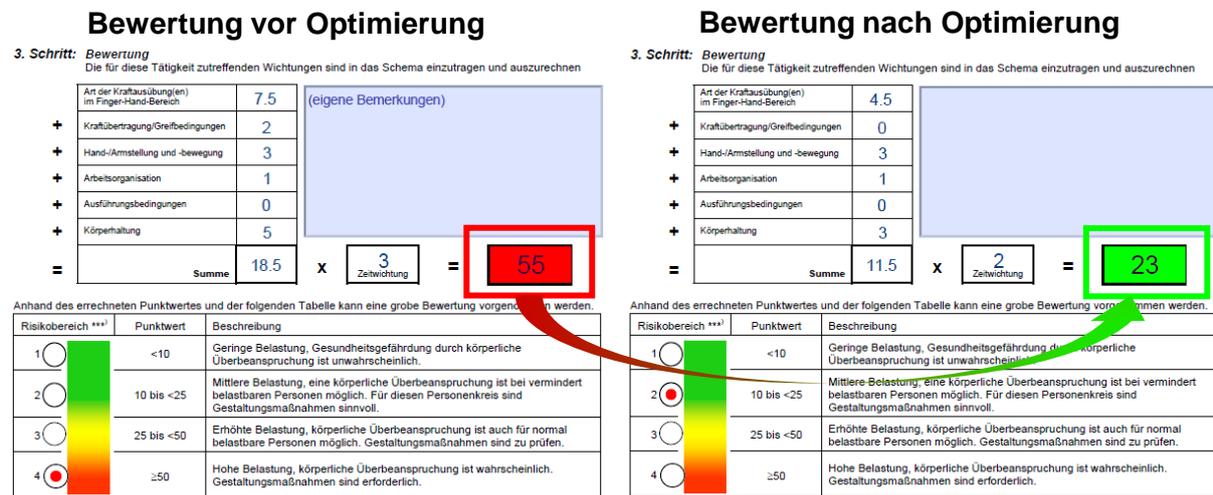


Abbildung 7.17 Ergebnis der LMM vor und nach der Optimierung

Einsparung manueller Arbeitsumfänge

Durch die Verwendung des Roboters können bei einem Mitarbeiter 40% Arbeitszeit innerhalb der Prozessstation eingespart werden. Da wie bereits zuvor dargestellt der Schraubprozess der Verkleidung üblicherweise von drei Mitarbeitern durchgeführt wird können hier ebenfalls Einsparungen erzielt werden. Bei einer breiten Nutzung der Lösung in weiteren Montagestationen für zusätzliche Verkleidungsteile am Unterboden, sind weitere erhebliche Einsparpotenziale vorhanden.

Fehlervermeidung

Durch den Einsatz des Robotersystems ist eine Überwachung der Durchführung der Verschraubungen und eine Erfassung der Schraubparameter möglich. Fehlerhaft oder nicht durchgeführte Verschraubungen können somit erkannt und behoben werden.

Arbeitsraumplanung

Vorgaben der Grobplanung

Im Validierungsszenario wird eine Montagestation in der Fließmontagelinie betrachtet. Hierbei wird das Fahrzeug in einem Gehängeförderer mit einer Elektrohängebahn auf über Kopf Höhe transportiert. Die Verkleidungsteile und Schrauben werden durch den Mitarbeiter am Materialanstellstreifen entnommen. Die Schrauben werden als Schüttgut, die Verkleidungsteile variantenabhängig sortiert in einem Materialbereitstellungswagen zur Verfügung gestellt. Als Taktzeit wird eine Zeit von 60s angenommen bei einer Taktlänge von 6 m.

Vorgaben aus der Prozessplanung und Verantwortlichkeitzuordnung

Wie in der Operationsreihenfolge in Abbildung 7.15 zu sehen ist, laufen die Montageprozesse sequentiell ab. Dies bedeutet für die Planung des Arbeitsraumes, dass keine parallelen Tätigkeiten im gleichen Arbeitsraum notwendig sind. Als Form der Mensch-Roboter Kooperation bietet sich somit die Koexistenz an. Hierbei führt der Roboter den Schraubvorgang durch, nachdem der Mitarbeiter die Verkleidung vorgefügt hat und den Arbeitsraum verlassen hat.

Aufteilung des Arbeitsraums

Aus den beiden zuvor dargestellten Vorgaben lässt sich die in Abbildung 7.18 gezeigte Aufteilung des Arbeitsraumes ableiten.

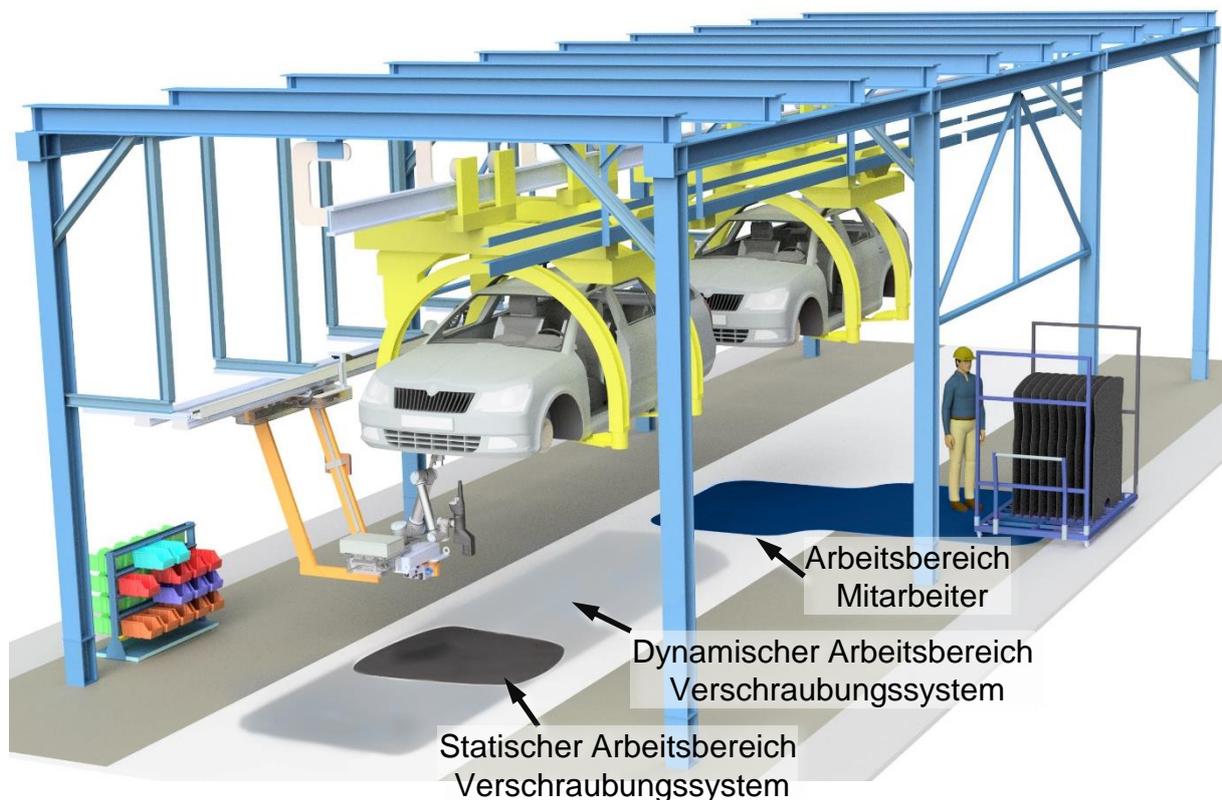


Abbildung 7.18: Aufteilung des Arbeitsraumes

Der Mitarbeiter entnimmt die Verkleidung am Materialanstellstreifen und führt unterhalb des Fahrzeuges das Vorfügen aus. Der resultierende Arbeitsraum ist in Abbildung 7.18 dargestellt. Die automatisierte Verschraubung wird mittels eines Schraubsystems

ausgeführt, welches sich unterhalb des Fahrzeuges bewegt und im Fließbetrieb mitgeführt wird. Der statische Arbeitsbereich ohne und der dynamische Arbeitsraum mit Fließbewegung ist in Abbildung 7.18 gezeigt.

Zur Absicherung des Roboters und des Schraubvorganges kann der Arbeitsraum sensorisch überwacht werden. Eine entsprechende Verantwortlichkeit wird definiert und bei der technischen Realisierung berücksichtigt.

7.3.3 Erstellung der Work List

Wie in Kapitel 7.3.2 beschrieben übernimmt das automatisierte System die Verschraubung der Unterbodenverkleidung und die Zufuhr der dafür benötigten Schrauben. Zur Durchführung des Schraubprozesses im Fließbetrieb werden zusätzliche Unterverantwortlichkeiten definiert, um die Synchronisation und Kopplung mit dem zu montierenden Fahrzeug zu ermöglichen. Es ergeben sich die folgenden Unterverantwortlichkeiten im prozeduralen Ablauf:

- Synchronisierung → StartList
- Kopplung → StartList
- Anfahren Schraubpunkte → MoveList
- Verschraubungsdetektion → FasteningList
- Verschraubung → FasteningList
- Schraubzuführung → FasteningList
- Entkopplung → StopList
- Rückfahrt → StopList

Zur Erstellung der Work List werden mehrere Sublisten gebildet, welche nacheinander aufgerufen werden. Diese sind in Abbildung 7.19 dargestellt:



Abbildung 7.19: Ablauf und Unterteilung der Work List

Die Start und Stop Sublist führen die Synchronisation sowie Kopplung zu Beginn, und die Entkopplung und Rückfahrt am Ende des Prozesses durch. Die Move List bewegt das Schraubwerkzeug auf die Vorposition zur Verschraubung. Die FasteningList führt den Ausgleich des Versatzes zwischen Vorposition und tatsächlicher Schraubstelle aus und startet den Schraubvorgang. Im Anschluss erfolgt die Zuführung der nächsten Schraube.

Dieser Ablauf soll nun mit dem CoRe-UI konfiguriert werden. Hierzu wird zunächst wie in Abbildung 7.20 gezeigt eine Hauptworklist („Process List“) erstellt.

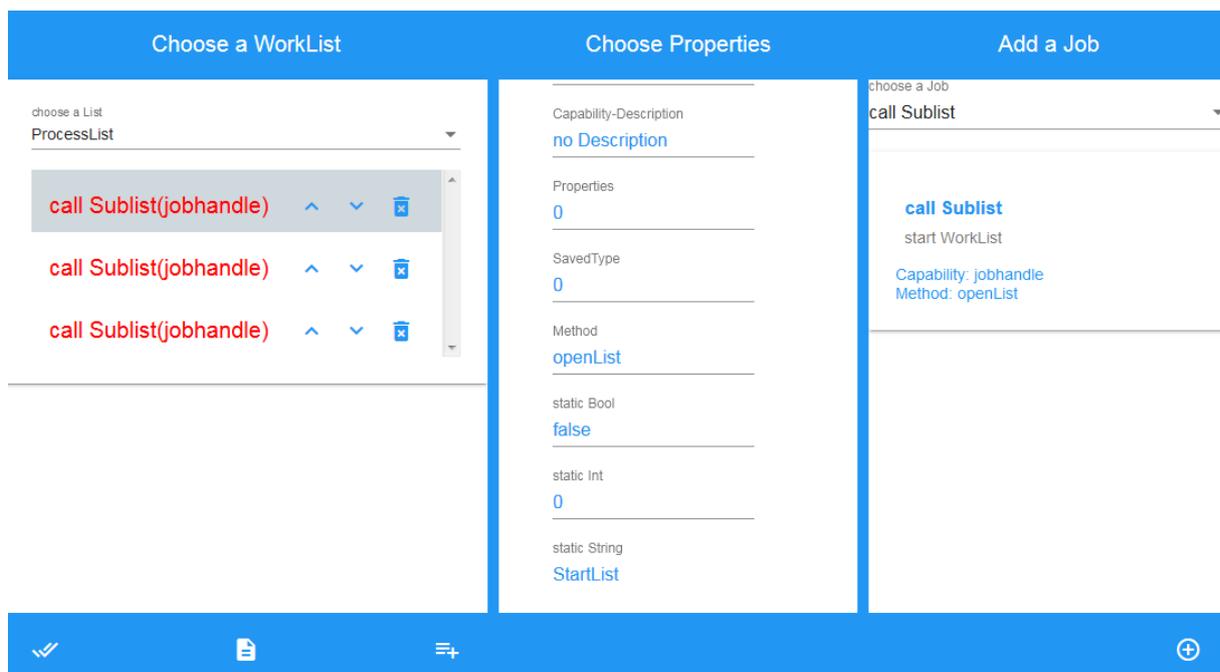


Abbildung 7.20: Erstellung der Work List mit dem CoRe-UI

Wie in der Abbildung zu erkennen, sind in der Hauptworklist die Aufrufe der Sub Lists „StartList“, „MoveList“ und „StopList“ integriert. Der Aufruf geschieht über den Job „call Sublist.“

In Abbildung 7.21 ist der Aufbau der Sub List „MoveList“ gezeigt. Nach der Bewegung des Endeffektors zur Vorposition der Schraubstelle wird von der „MoveList“ die „FasteningList“ als Sub List aufgerufen.

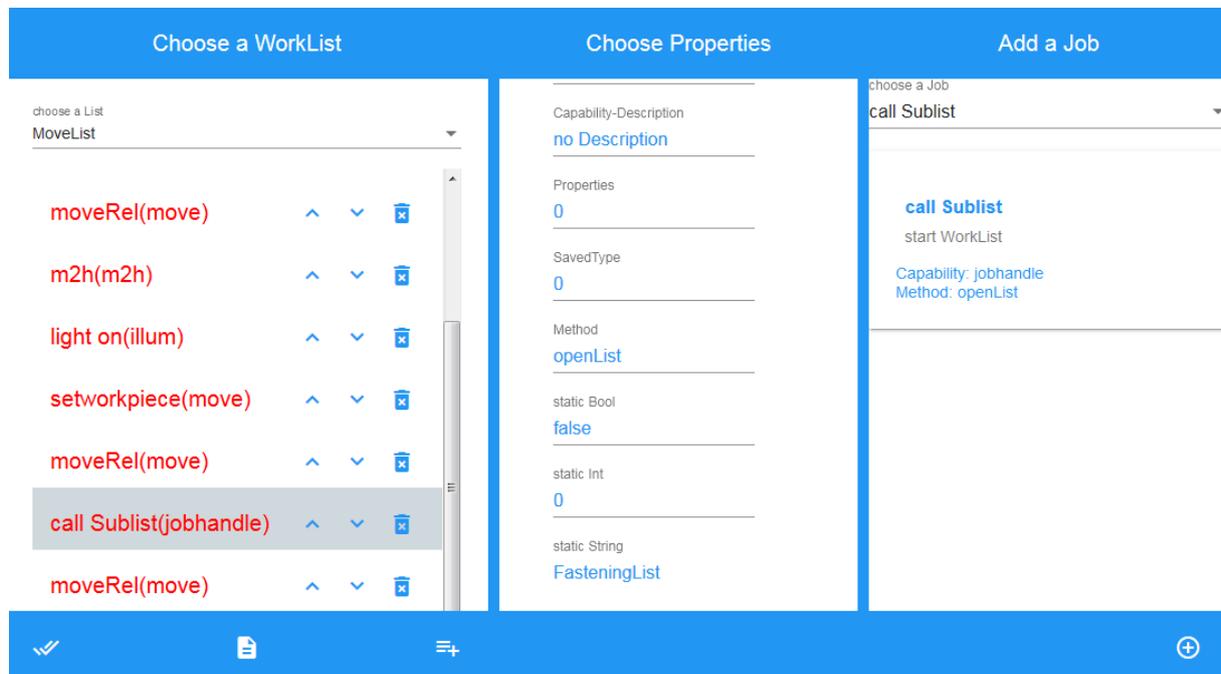


Abbildung 7.21: Aufbau und Bestandteile der Sub List MoveList

Im Detail laufen in den einzelnen Listen die folgenden Vorgänge ab:

StartList: Es erfolgt eine Synchronisation zwischen dem Schraubsystem und dem zu montierenden Fahrzeug. Nach Abschluss der Synchronisierung wird eine Kopplung hergestellt.

MoveList: Innerhalb der MoveList wird zunächst die genaue Höhe des Fahrzeugs über dem Schraubsystem eingemessen. Im Anschluss wird das Schraubsystem zur Vorposition des Schraubpunktes verfahren und die Sub List Fastening List aufgerufen.

Fastening List: Zur Durchführung des Schraubprozesses muss das Schraubwerkzeug unter der Schraubstelle positioniert werden. Hierzu muss der Abstand zwischen der Vorposition und der tatsächlichen Schraubposition gemessen werden. Dazu wird ein System Job genutzt, welcher durch Nutzung mehrerer Capabilities eine Messung vornimmt. Zunächst wird die Höhe des Schraubwerkzeuges unter der Verkleidung bestimmt. Im Anschluss wird dann der Abstand in X und Y Richtung zur Schraubstelle unter Berücksichtigung des Höhenwertes ermittelt. Ist dieser Wert bekannt, wird das Schraubwerkzeug unter der gemessenen Schraubstelle positioniert und der Schraubvorgang gestartet. Im Anschluss daran wird die nächste Schraube zugeführt.

Nach Abschluss der FasteningList wird in die MoveList zurückgesprungen und der nächste Schraubpunkt wird angefahren. Dies wird solange wiederholt, bis alle Verschraubungen gesetzt wurden.

StopList: Die StopList löst zunächst die Kopplung zwischen dem Schraubsystem und dem Fahrzeug und startet im Anschluss das Zurückführen des Systems auf die Ausgangsposition.

Nach der Erstellung der Work List werden nun im folgenden Kapitel die benötigten Modulklassen zur Erfüllung der Verantwortlichkeiten bestimmt.

7.3.4 Festlegung der benötigten Modulklassen und techn. Parameter

Aufgrund der Unterverantwortlichkeiten der Work List und der somit notwendigen Capabilities können die benötigten Modulklassen bestimmt werden:

- Synchronisierung → Transport System
- Kopplung → Transport System
- Anfahren der Schraubvorposition → Robot System, Sensor
- Detektion der Schraubpunkte → Intelligent Sensor, Simple Output Device
- Verschraubung → Tool
- Schraubzuführung → Feeding System
- Entkopplung → Transport System
- Rückfahrt → Transport System

Zusätzlich soll wie in Kapitel 7.3.2 beschrieben zur Absicherung eine Arbeitsraumüberwachung vorgenommen werden. Ebenso ist eine Möglichkeit zur Interaktion mit dem automatisierten System erforderlich. Hierzu werden die folgenden Zuordnungen durchgeführt:

- Arbeitsraumüberwachung → Safety Components
- Interaktionsmöglichkeit → Human Machine Interface

Transport System: Das Transport System muss das Roboter System mit allen Sensoren und dem Schraubwerkzeug über die Zeitdauer des Prozesses mit dem Montageobjekt synchron mitführen und einen quasi statischen Zustand erzeugen. Hierzu wird das System über eine Länge von ca. 2 Montagetakten mitgeführt was einer Verfahrlänge von 12 m entspricht. Das System muss in der Lage sein, das Gewicht der Komponenten zu tragen und in eine bestehende Montagelinie eingefügt werden können.

Robot System: Das Robotersystem muss das Schraubwerkzeug, alle benötigten Sensoren und die Komponenten des Zuführsystems im Arbeitsraum positionieren. Hierzu ist je nach Ausführung eine Nennlast des Roboters von ca. 9 kg erforderlich. Der benötigte Arbeitsraum ist in Abbildung 7.22 dargestellt. Hieraus ergibt sich eine benötigte Reichweite des Roboters von mindestens 1212 mm. Der Roboter soll generell dazu

geeignet sein mit Menschen zusammenzuarbeiten, wenn entsprechende Sicherheitsmaßnahmen getroffen werden (Vgl. Kapitel 5.4.2).

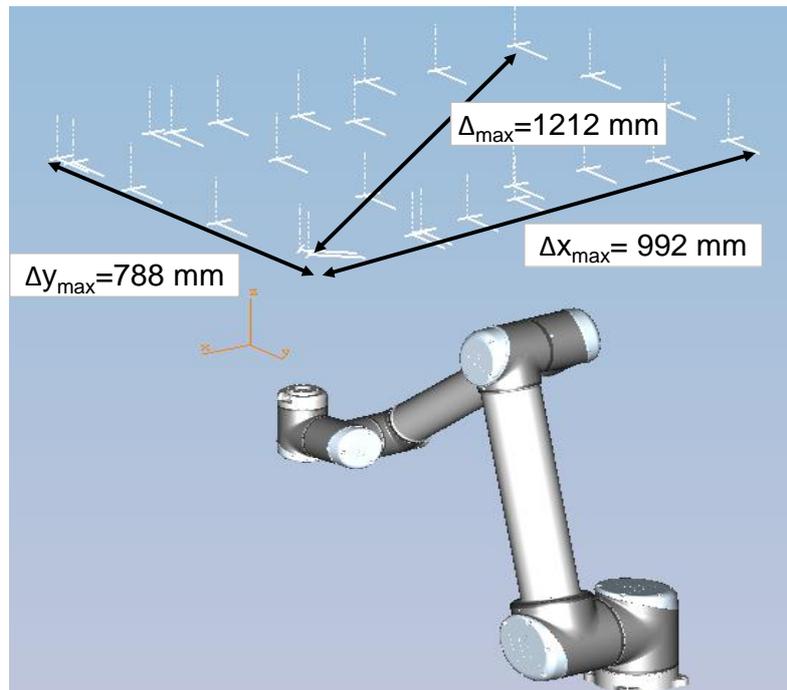


Abbildung 7.22: Benötigter Arbeitsraum des Roboters

Sensor: Es ist ein Sensor notwendig, um durch Nutzung des Roboters Abstandsmessungen im Arbeitsraum vornehmen zu können. Hierfür wird ein Messbereich von ca. 20 - 500mm benötigt.

Intelligent Sensor: Der Sensor muss in der Lage sein von einer Vorposition aus die räumliche Lage des Schraubpunktes zu bestimmen und eine Ausrichtung des Schraubwerkzeugs mit einer radialen Abweichung von ca. 0,2 mm ermöglichen.

Tool: Das Schraubwerkzeug muss die in Kapitel 7.2 beschriebenen Schrauben mit einem Moment von 2,8 Nm anziehen können. Zur Prozessüberwachung sollen die Schraubparameter (Endmoment, Anzugswinkel, Einschraubtiefe) überwacht und aufgezeichnet werden. Zum Handling mit einem Roboter soll das Gewicht möglichst niedrig sein.

Feeding System: Das Zuführsystem muss die in Kapitel 7.2 beschriebenen Schrauben in einer definierten Lage zuführen und dem Schraubwerkzeug bereitstellen.

Simple Output Device: Zum Ausleuchten der Schraubstellen und Vermeidung von Umgebungslichteinfluss ist eine Beleuchtungseinrichtung nötig

Safety Component: Zur Absicherung des automatisierten Prozesses soll eine Möglichkeit geschaffen werden, den Arbeitsraum zu überwachen, um bei Erkennen einer Gefahr den Prozess abubrechen. Ebenso muss eine Kollision mit den Mitarbeiter bei der Rückfahrt des Transportsystems verhindert werden.

Human Machine Interface (HMI): Um dem Mitarbeiter die Möglichkeit zu geben eine Übersicht über den Status des Prozesses zu erhalten und im Bedarfsfall Eingaben vornehmen zu können, soll ein Human Machine Interface genutzt werden.

Zur Bestimmung der technischen Ausprägung im folgenden Kapitel sind die relevanten Daten in untenstehender Tabelle zusammengefasst.

Modulklasse	Tech. Parameter	Beschreibung
Transport System	Verfahrweg ca. 12 m, Traglast=Eigengewicht+Komponenten	Erfüllung Sicherheitsbestimmung, Integrierbar in bestehende Montagelinie
Robot System	Nennlast 9 kg, Reichweite > 1212mm	generelle MRK Tauglichkeit
Sensor	Abstandsmessung 20-500mm	Messung von Abständen
Intelligent Sensor	radiale Positioniergenauigkeit <0,2 mm	Messung der räumlichen Lage der Verschraubungspunkte
Tool	Anzugsmoment 2,8 Nm, Außensechskant SW 8	Überwachung der Verschraubungsparameter, niedriges Gewicht
Feeding System	Zuführung Schraube TS 5x17	Zuführung der Schrauben in definierter Lage, geringes Gewicht
Simple Output Device		Ausleuchtung Schraubstellen
Safety Component		Überwachung des Arbeitsraumes
HMI		Prozessübersicht, Möglichkeit der Interaktion

Abbildung 7.23: Übersicht der benötigten Modulklassen

7.4 Technische Realisierung

Innerhalb dieses Kapitels werden auf Grundlage der erstellten Work List, der definierten Modulklassen und technischen Parameter geeignete technische Lösungsmöglichkeiten ausgewählt. Die erstellte Konfiguration wird dann bewertet und finalisiert. Im Anschluss wird der geplante Ablauf des Gesamtprozesses unter Berücksichtigung der technischen Umsetzung beschrieben.

7.4.1 Bestimmung der technischen Lösungsmöglichkeiten

Die Konfiguration der technischen Lösung erfolgt durch eine Auswahl der Modulausprägungen. Die bereits vorhandenen Betriebsmittel werden direkt über das CoRe-UI ausgewählt und parametrisiert. Dieser Vorgang ist in Abbildung 7.24 am Beispiel der Konfiguration des Robot Systems dargestellt.

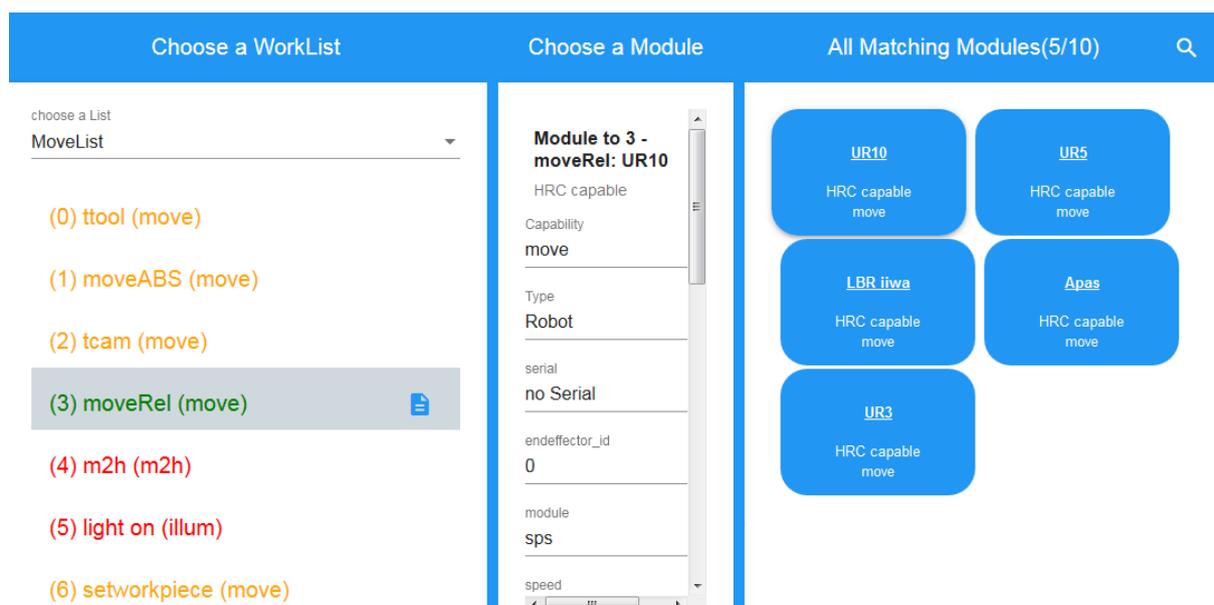


Abbildung 7.24: Konfiguration des Robot System

Zu erkennen ist die Liste MoveList, in welcher der Job einer relativen Bewegung ausgewählt ist. Um diese Verantwortlichkeit zu erfüllen, wird ein Roboter des Typs UR 10 aus der Auswahl der verfügbaren Betriebsmittel auf der rechten Seite ausgesucht und hinzugefügt. Grundlage für diese Entscheidung ist die hohe Reichweite des UR 10 (1300 mm) in Kombination mit einer Nennlast von 10kg und einer generellen Eignung zur MRK. Die vorhandenen Ausprägungen können hierzu durch die Suchfunktion anhand der Parameter gefiltert werden (Vgl. Abbildung 6.12). Der gewählte Roboter muss anschließend in der mittleren Ansicht parametrisiert werden. Hierzu werden unter anderem eine IP-Adresse und die Portnummer eingegeben.

In gleicher Art und Weise werden die übrigen benötigten Modulausprägungen definiert:

Sensor:

Zur Abstandmessung innerhalb der Arbeitszelle wird ein Lasertriangulationssensor ausgewählt, welcher den benötigten Reichweitenbereich von 20-500 mm abdeckt

Intelligent Sensor:

Zur Detektion der Fügstellen wird ein System Job genutzt, welcher zur Ausführung auf den Laserabstandsensoren und die Kamera zugreift. Diese Anordnung misst in 2,5 D und kann die räumliche Lage der Schraubpunkte erfassen. Die Messung im Bild erfolgt mittels eines Bildverarbeitungsalgorithmus. Diesem wird der gemessene Abstandswert des Lasersensors mitgeteilt und eine Berechnung der X und Y Koordinate erfolgt mittels Auswertung des Bildes mit einer hinterlegten Abstandsfunktion. Diese Werte werden dann in der Einheit mm an das Steuerungskonzept übermittelt und ein entsprechender Bewegungsbefehl für den Roboter wird erstellt. Ein Ausschnitt aus dem Ablauf des Algorithmus ist in Abbildung 7.25 gezeigt.

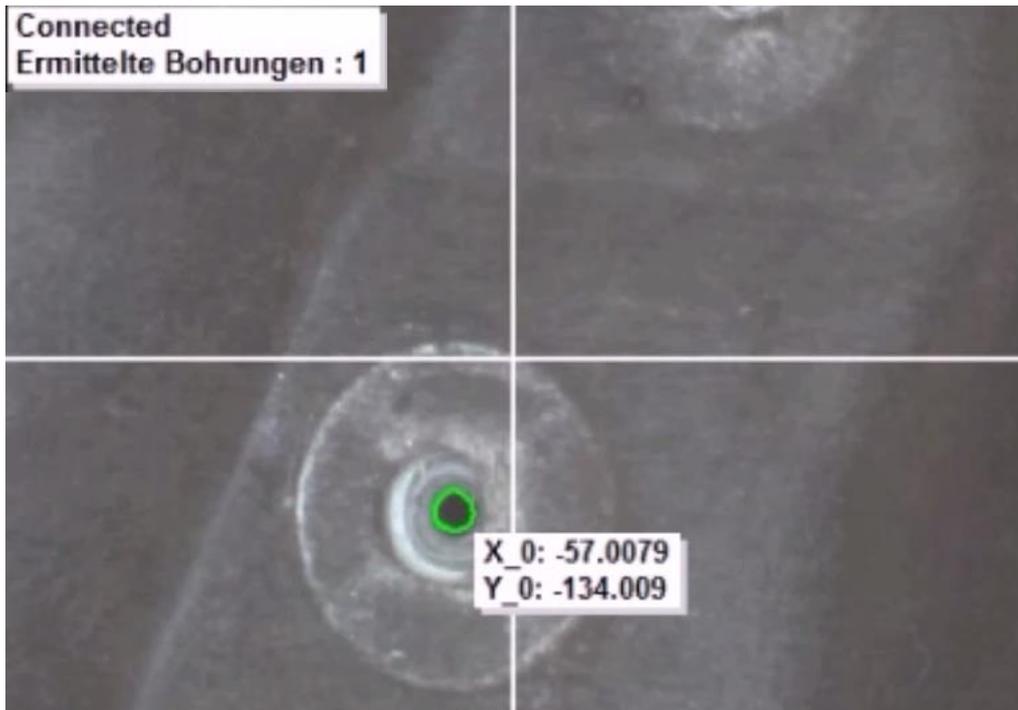


Abbildung 7.25: Bildverarbeitungsalgorithmus zur Verschraubungsdetektion

Der entwickelte 2,5D Sensor wurde als Modul gekapselt und steht innerhalb der Datenbank zur Wiederverwendung zur Verfügung.

Tool:

Zur Durchführung des Schraubprozesses wurde eine Schraubspindel mit EC-Motor ausgewählt, um ein stromgesteuertes Anziehverfahren durchführen zu können. Dieses Verfahren ermöglicht die Vermeidung zusätzlicher Sensorik zur Drehmomentmessung und verringert das Gewicht und die Anschaffungskosten. Der Schrauber verfügt über eine pneumatisch gesteuerte Zustellung des Schraubbits, um die Vorschubbewegung während des Schraubprozesses durchzuführen. Über einen analogen Tiefenmesser wird die Stellung des Bits in Schraubrichtung (= Einschraubtiefe) überwacht. Zusätzlich wird die Schraubzeit und der Motorstrom gemessen, um eine Aussage über den Erfolg der Verschraubung treffen zu können.

Simple Output Device:

Zur sicheren Detektion der Schraubstellen und der Vermeidung eines Einflusses der Umgebungsbeleuchtung wird eine LED-Ringleuchte genutzt, um die Schraubstellen am Unterboden auszuleuchten.

In Abbildung 7.26 links ist der Aufbau des Endeffektors mit Werkzeug und angebrachter Sensorik gezeigt. Auf der rechten Seite ist das Werkzeug mit einer Umhausung zur Absicherung des Werkzeuges dargestellt.

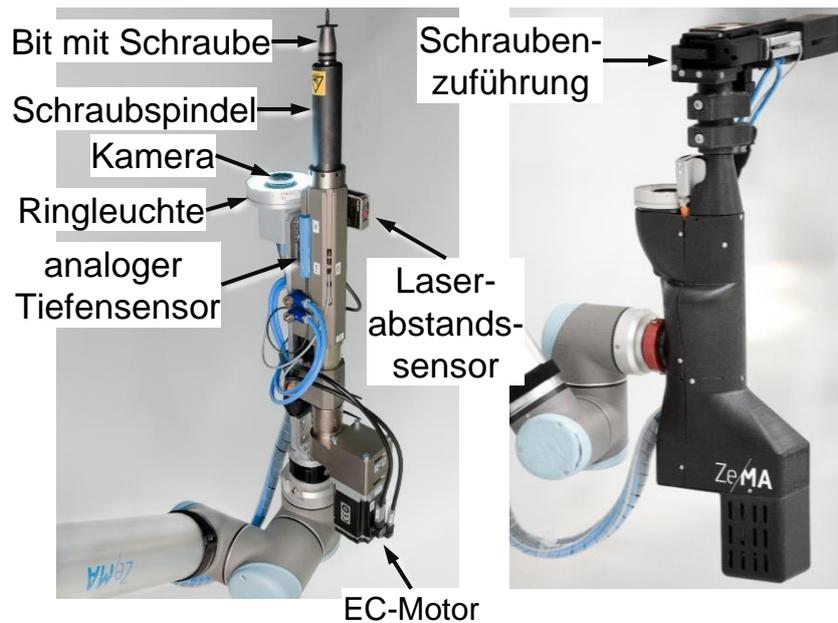


Abbildung 7.26: Endeffektor mit Werkzeug und angebrachter Sensorik

Feeding System:

Zur Durchführung der Schraubenzuführung ist aufgrund des ungünstigen Länge zu Durchmesser Verhältnisses der Schraube mit angebrachter Unterlegscheibe eine seitliche Zuführung notwendig. Aus diesem Grund kann die Schraube nicht über einen herkömmlichen Zuführschlauch eingeschossen werden. Zusätzlich muss das Gewicht so gering wie möglich sein, um die maximale Traglast des Roboters nicht zu überschreiten. Aus diesem Grund wurde die in Abbildung 7.27 gezeigte Zuführung entwickelt. Der Schraubenvorrat ist in einem Magazin untergebracht. Die Zuführung der Schrauben erfolgt durch Druckluft, welche am Ende des Magazins eingeblasen wird und eine Vorschubbewegung der Schrauben auslöst. Die Separation und Ausrichtung der Schrauben wird durch ein Schiebersystem durchgeführt, welches über einen Pneumatikzylinder bewegt wird.



Abbildung 7.27: Schraubenzuführeinheit mit Magazin

Transport System:

Wie in Kapitel 3.2.2 gezeigt existieren bereits einige Anwendungen zur Umsetzung einer Mensch-Roboter Kooperation in der Fließmontage mit zugehörigen Transportsystemen zur Synchronisierung. Die benötigten Anforderungen für einen Einsatz in

einer bestehenden Montagelinie und ein breites Anwendungsfeld konnten von den bestehenden Lösungen nicht ausreichend erfüllt werden (Vgl. Kapitel 3.2.2). Aus diesem Grund wurde ein Transportsystem neu entwickelt. Um die geforderten Verantwortlichkeiten der Synchronisation und Kopplung zu erfüllen, besteht das System aus einer schwenkbaren schienengeführten Transporteinheit und einem Ausgleichssystem mit Kopplungsmechanismus. Um ein möglichst robustes System mit hoher Verfügbarkeit zu erhalten, wurden Funktionen größtenteils mechanisch umgesetzt, angesteuert und durch Pneumatiksysteme bewegt.

Schienengeführte schwenkbare Transporteinheit:

Um eine Nutzung in einer bestehenden Montagelinie und eine breite Anwendbarkeit an vielen Stellen der Montagelinie zu ermöglichen, wurde ein deckengeführtes System entwickelt. Dies bietet den Vorteil, dass der Boden frei bleibt und eine Medienversorgung von oben erfolgen kann. Die benötigten Schienensysteme sind an vielen Stellen bereits vorhanden oder können an Abhängungen befestigt werden.

Das Schwenksystem bietet den Vorteil der Kompaktheit. Nach Prozessende werden die Betriebsmittel seitlich in einen platzsparenden Zustand ausgeschwenkt, sodass ein Großteil des Arbeitsraumes frei wird. Hierzu wurden die Tragarme drehbar gelagert und sind durch einen Pneumatikzylinder bewegbar. Der Pneumatikzylinder verfügt über eine Vorrichtung zur Verriegelung der Kolbenstange, sodass die gesamte Vorrichtung in ihrer Lage arretiert werden kann. Zur Umsetzung werden zwei Ventile und zwei Endlagensensoren verwendet. Verfahren wird das System über eine Schienenführung, welche über einen Zahnriemen mit einem Antrieb verbunden ist. Der Aufbau ist in Abbildung 7.28 gezeigt.

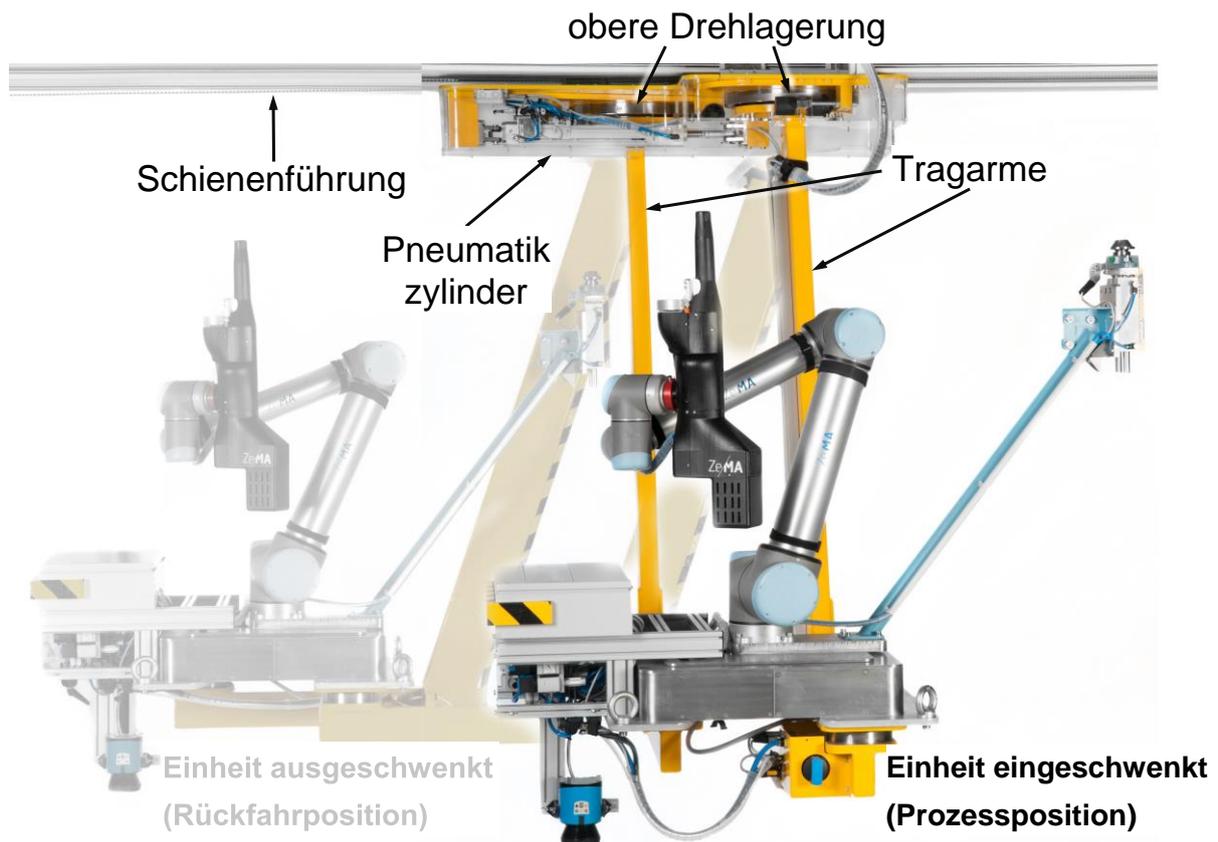


Abbildung 7.28: Aufbau der Transporteinheit und Schwenkbewegung

Ausgleichssystem mit Kopplungsmechanismus:

Um während des Prozesses Störeinflüsse auf den Schraubprozess durch Schwingungen, Verschiebungen oder Verzögerungseinflüsse zu vermeiden wurde ein Ausgleichssystem entwickelt, welches in X und Y Richtung einen Ausgleich um +/- 50 mm zulässt. Dieser Bereich ist ausreichend, um die Störeinflüsse, welche experimentell bestimmt wurden, kompensieren zu können. Am Ausgleichssystem ist ein Kopplungsmechanismus angebracht, welcher sich mit dem Fahrzeug fest verbindet. In diesem Fall wurde die Aufnahme des Transportsystems am Unterboden des Fahrzeugs zur Ankopplung gewählt. Nach Ankopplung ist das Schraubsystem somit fest mit dem Unterboden verbunden und die Störeinflüsse werden durch die Ausgleichseinheit aufgenommen. Zur Zentrierung und Fixierung in der Mittellage verfügt das Ausgleichssystem über vier Pneumatikzylinder. Ebenso sind zur Erfassung der Auslenkung Endlagensensoren, sowie der Kopplung des Adaptionisdorns ein Abstandssensor verbaut. Der Aufbau ist in Abbildung 7.29 dargestellt.

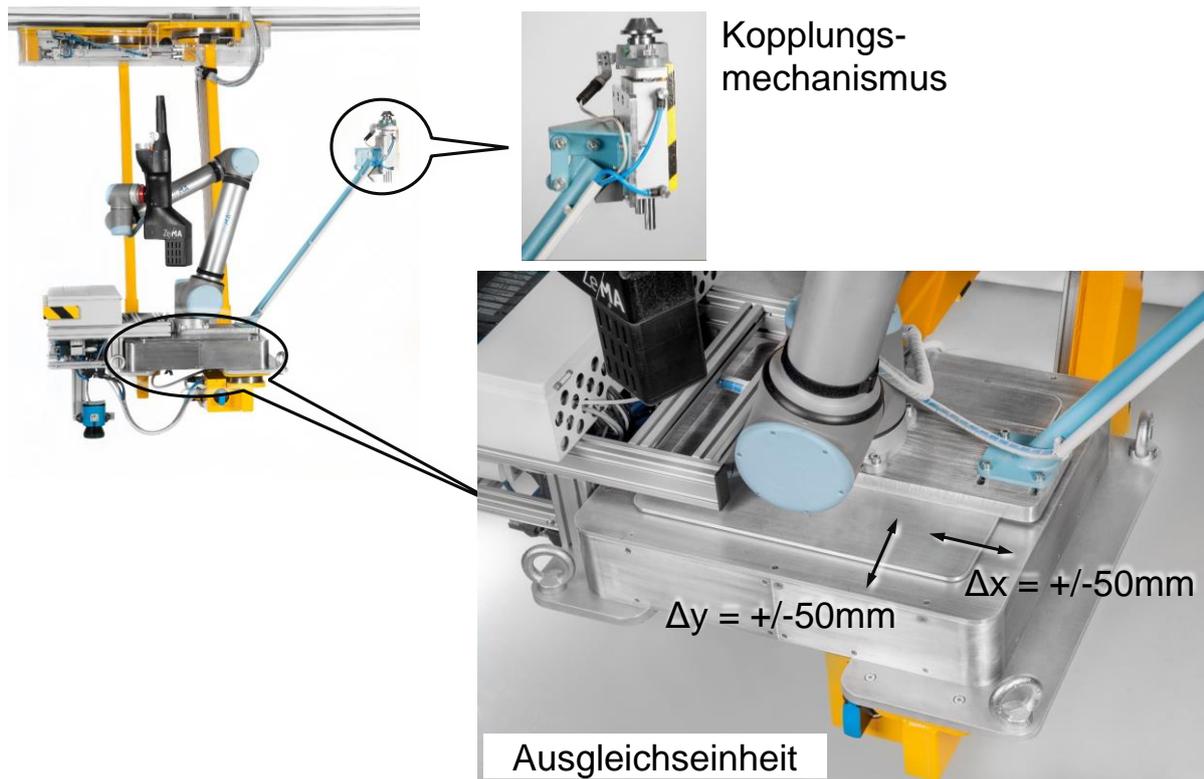


Abbildung 7.29: Ausgleichseinheit und Kopplungsmechanismus

In Abbildung 7.30 in die Anbindung der Prozesseinheit an das Fahrzeug dargestellt. Durch die Kopplung ergibt sich eine geschlossene kinematische Kette ausgehend vom Ankopplungspunkt am Unterboden bis zum Schraubwerkzeug. Die verwendete Ausgleichseinheit macht das System unabhängig von Umgebungseinflüssen und eine Relativbewegung zwischen dem Schraubsystem und dem Unterboden kann während des Prozesses verhindert werden. Dies ermöglicht einen störungsfreien Prozessablauf.

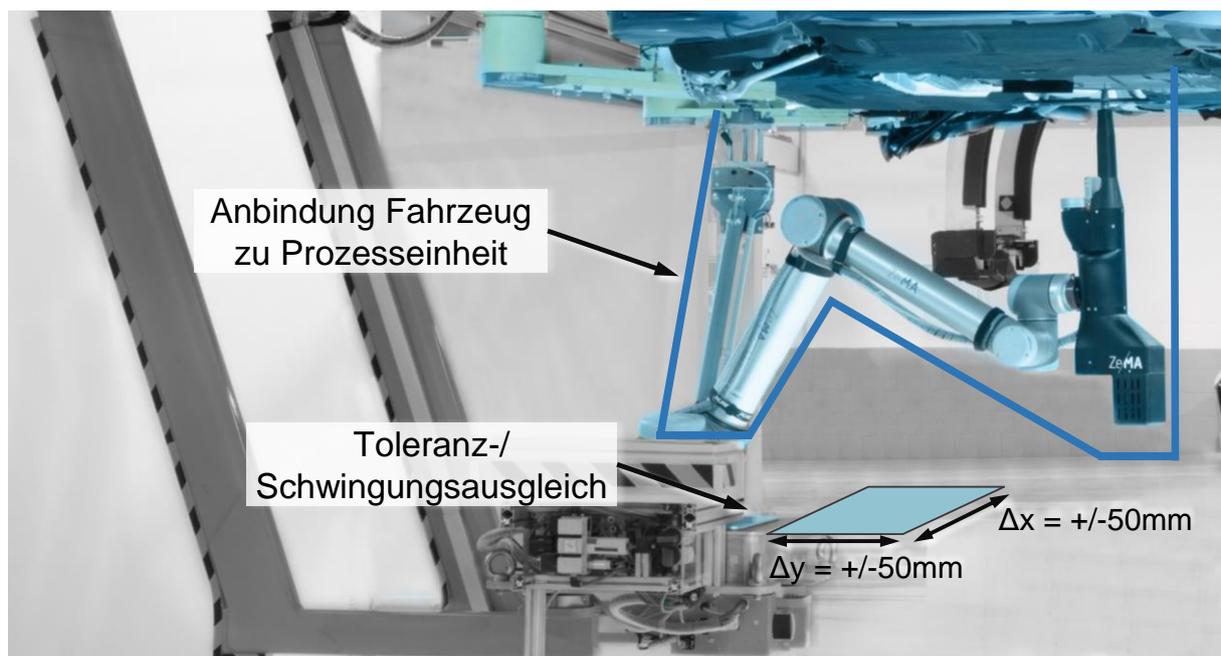


Abbildung 7.30: Anbindung der Prozesseinheit an das Fahrzeug

Synchronisationsprinzip:

Die Synchronisation wird durch das Transportsystem mittels Laserabstandssensor und einer zugehörigen Drehzahlsteuerung des Antriebs durchgeführt. Für die Steuerung ist am Fahrzeuggehänge ein Referenzblech befestigt, welches zur Abstandmessung dient. Dieser Abstand ist vorgegeben und wird über eine Drehzahlsteuerung konstant gehalten. Der Aufbau ist in Abbildung 7.31 dargestellt.

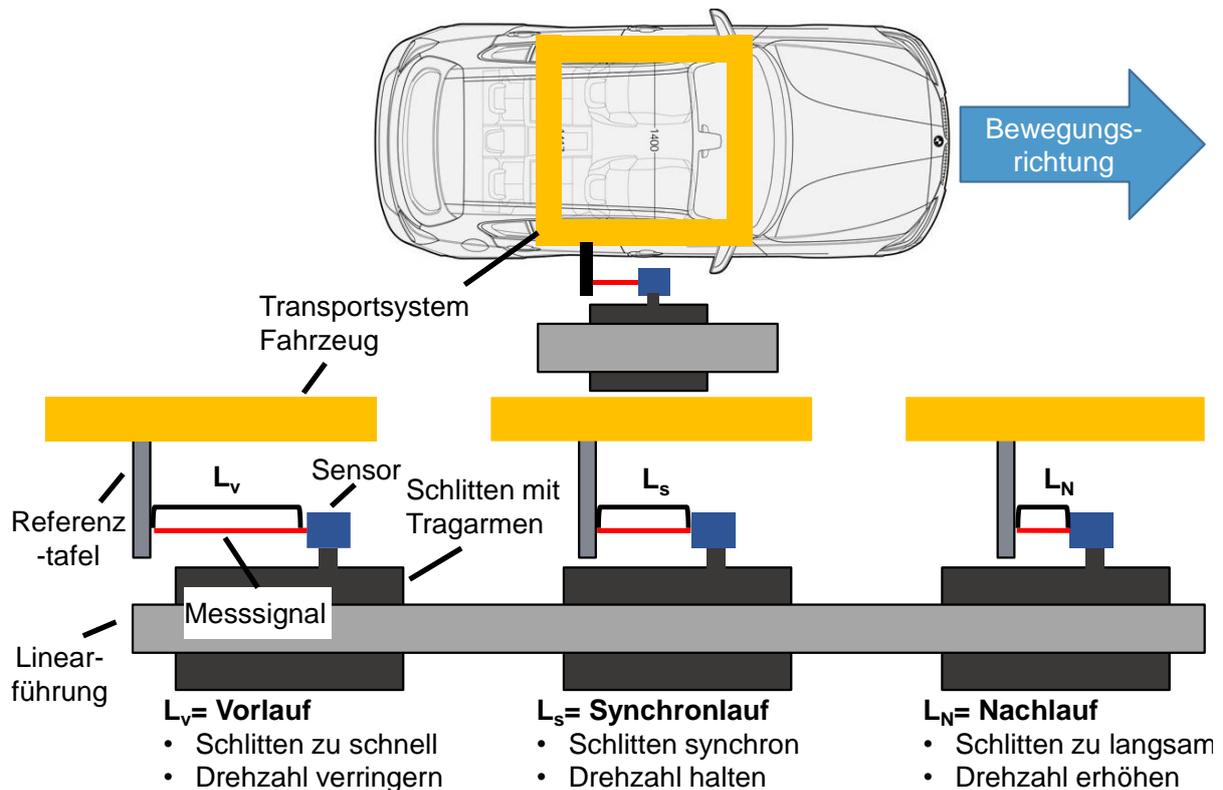


Abbildung 7.31: Prinzip zur Synchronisation und Drehzahlsteuerung des Antriebes

Sollte ein Problem bei der Synchronisation auftreten, weil der Abstand nicht konstant gehalten werden kann oder die Ausgleicheinheit zu weit ausgelenkt ist, so wird wie in Kapitel 6.6.3 beschrieben, über die Routine „checkcondition()“ ein Abbruch der Work List eingeleitet. Die Kopplung zum Fahrzeug wird hierbei getrennt und ein sicherer Zustand hergestellt.

Safety Component

Zur Absicherung des Arbeitsraumes wird ein Sicherheitslaserscanner genutzt. Diese Laserscanner sind in der Industrie weit verbreitet und haben einen großen Erfassungsbereich. Innerhalb dieses Bereiches können auf Grundlage von Berechnungen Felder angelegt werden, um bestimmte Aktionen auszulösen. Die Vorgehensweise zur Absicherung ist in Kapitel 7.4.3 beschrieben.

Human Machine Interface

Zur Umsetzung des Human Machine Interface wird der Process Monitor des CoRe-UI genutzt, welcher in Kapitel 6.6.2 beschrieben ist. Dieser ermöglicht die geforderte Prozessübersicht und bietet die Möglichkeit einer Interaktion. Die Umsetzung ist in Kapitel 7.5.3 gezeigt.

Zusammenfassend sind in folgender Tabelle die konfigurierten Modulausprägungen aufgelistet. Im Folgenden Kapitel wird die Konfiguration bewertet und finalisiert.

Modulkategorie	Tech. Parameter	Beschreibung	gewählte Modulausprägung
Transport System	Verfahrweg ca. 12 m, Traglast= Eigengewicht + Komponenten	Erfüllung Sicherheitsbestimmung, Integrierbar in bestehende Montagelinie	schienengeführter Tragarm mit Schwenkfunktion
Robot System	Nennlast 9 kg, Reichweite > 1212mm	generelle MRK Tauglichkeit	Universal Robots UR 10
Sensor	Abstandsmessung 20-500mm	Messung von Abständen	Lasertriangulations sensor
Intelligent Sensor	radiale Positioniergenauigkeit <0,2 mm	Messung der räumlichen Lage der Verschraubungspunkte	2,5 D Messsystem mit Kamera
Tool	Anzugsmoment 2,8 Nm, Außensechskant SW 8	Überwachung der Verschraubungsparameter niedriges Gewicht	Schraubspindel mit EC-Motor
Feeding System	Zuführung Schraube TS 5x17	Zuführung der Schrauben in definierter Lage, geringes Gewicht	pneumatisches Magazin
Simple Output Device		Ausleuchtung Schraubstellen	LED-Ringbeleuchtung
Safety Component		Überwachung des Arbeitsraumes	Sicherheitslaserscanner
HMI		Prozessübersicht, Möglichkeit der Interaktion	Process Monitor CoRe-UI

Abbildung 7.32: Konfigurierte Modulausprägungen

7.4.2 Festlegung der finalen Konfiguration

Die gewählte Konfiguration wird nach den in Kapitel 6.4.3 definierten Kriterien bewertet.

Bewertung des Prozessablaufs

Der Prozessablauf wurde durch eine zweistufige Simulation abgesichert. Zunächst wurde ein stationärer Aufbau betrachtet, in dem der Roboter und die angeschlossenen Komponenten (Messsystem, Schrauber) eingefügt waren. Hierbei wurde die generelle

Erreichbarkeit aller Schraubpunkte abgesichert und eine optimale Positionierung des Robotersystems im Arbeitsraum vorgenommen. Dies ist in Abbildung 7.33 auf der linken Seite zu sehen.

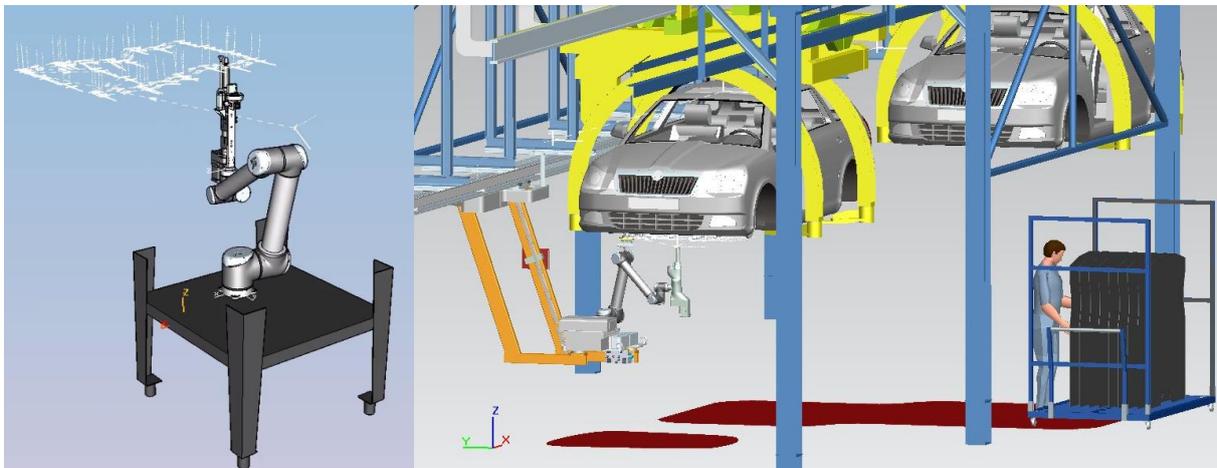


Abbildung 7.33: zweistufige Simulation des Prozesses

Im Anschluss wurde das Komplettsystem im Fließbetrieb simuliert. Hierbei wurde der Prozessablauf insgesamt überprüft und untersucht, ob die benötigte Zeit und der Arbeitsraum ausreichend sind. Dies ist in Abbildung 7.33 auf der rechten Seite zu sehen.

Als Ergebnis der Simulation wurde festgestellt, dass die gewählten Komponenten in der Kombination geeignet sind, um den Prozess auszuführen.

Wirtschaftliche Bewertung

Zur beispielhaften Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurde die in Abbildung 7.34 gezeigte Investitionsrechnung durchgeführt. Die verwendeten Zahlen basieren auf branchenüblichen Werten und Erfahrungen. Je nach Hersteller, Produktionssituation und speziellen Anforderungen können sich Änderungen ergeben.

Parameter:		Analyse:	
Gesamtsumme Investition	550.000 €	<i>Statische Investitionsrechnung:</i>	
Betriebskosten p.A.	27.500 €	Amortisationszeit	1,9 Jahre
Einsparungen p.A.	320.000 €	Jährlicher Überschuss	292.500 €
Zinsfaktor	8%	Kosten Nutzen Rechnung	1.205.000 €
Projektlaufzeit	6 Jahre	<i>Dynamische Investitionsrechnung:</i>	
		Net Present Value (Kapitalwert)	852.000 €

Abbildung 7.34: Investitionsrechnung zur wirtschaftlichen Bewertung

Die Gesamtsumme der Investition in die Anlagentechnik und Integration wurde mit ca. 550.000€ angenommen. Es ergeben sich jährliche Betriebskosten von ca. 27.500€. Durch Einsparungen bei manueller Montagezeit lässt sich ein jährlicher Überschuss von ca. 292.500 € erzielen. Hierbei wurde von einem Zweischichtbetrieb und der Reduktion von drei auf einen Mitarbeiter ausgegangen. In der Analyse ergibt sich daraus eine Amortisationszeit von ca. 1,9 Jahren. Der statische Kosten-Nutzen Vorteil ist bei

einer Laufzeit von 6 Jahren ca. 1,2 Mio €. Die angenommenen 6 Jahre entsprechen einem typischen Produktlebenszyklus in der Automobilindustrie. Im dynamischen Bereich ergibt sich ein Kapitalwert von über 850.000 €. Die Berechnung ist detailliert im Anhang II eingefügt.

Aufgrund dieser Analyse lässt sich feststellen, dass die üblicherweise geforderte Amortisationszeit von 2 Jahren sicher erreicht werden kann und die Investition signifikante Kostenvorteile bringt.

Abdeckung der Varianz

Im Falle des verwendeten Testfahrzeuges kann eine Abdeckung fast aller Varianten sowie auch anderer Fahrzeugtypen sichergestellt werden. Dies beruht darauf, dass der Arbeitsraum bei allen Varianten annähernd gleich groß ist. Ebenso werden einheitliche Schrauben über alle Modelle hinweg verwendet. Unterschiedlich ist lediglich je nach Variante die Position der Verschraubungen. Dies kann über variantenspezifische Work Lists ausgeglichen werden, welche entsprechend im Steuerungskonzept geladen werden.

Die Bewertung zeigt, dass mit der gewählten Konfiguration der Prozess durchgeführt werden kann. Ebenso ist es möglich, fast alle produzierten Varianten abzudecken. Die Untersuchung der Wirtschaftlichkeit ergibt hohe Kostenvorteile und die üblicherweise geforderte Amortisationszeit kann deutlich unterboten werden.

Als Ergebnis lässt sich somit festhalten, dass die gewählte Konfiguration die Anforderungen aus wirtschaftlicher und technischer Sicht erfüllt und signifikante Optimierungspotenziale erschlossen werden können. Somit wurde entschieden, die Anlage mit der vorliegenden Konfiguration zu implementieren. Hierzu wird im Folgenden zunächst der geplante Ablauf des Gesamtprozesses beschrieben.

7.4.3 Gesamtprozessablauf mit der gewählten Umsetzung

Der Ablauf des Gesamtprozesses und die Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter ist in Abbildung 7.35 dargestellt. Angenommen wird eine üblicherweise in der Automobilindustrie verwendeten Taktzeit von 60 s und eine Taktlänge von 6 m im Fließbetrieb.

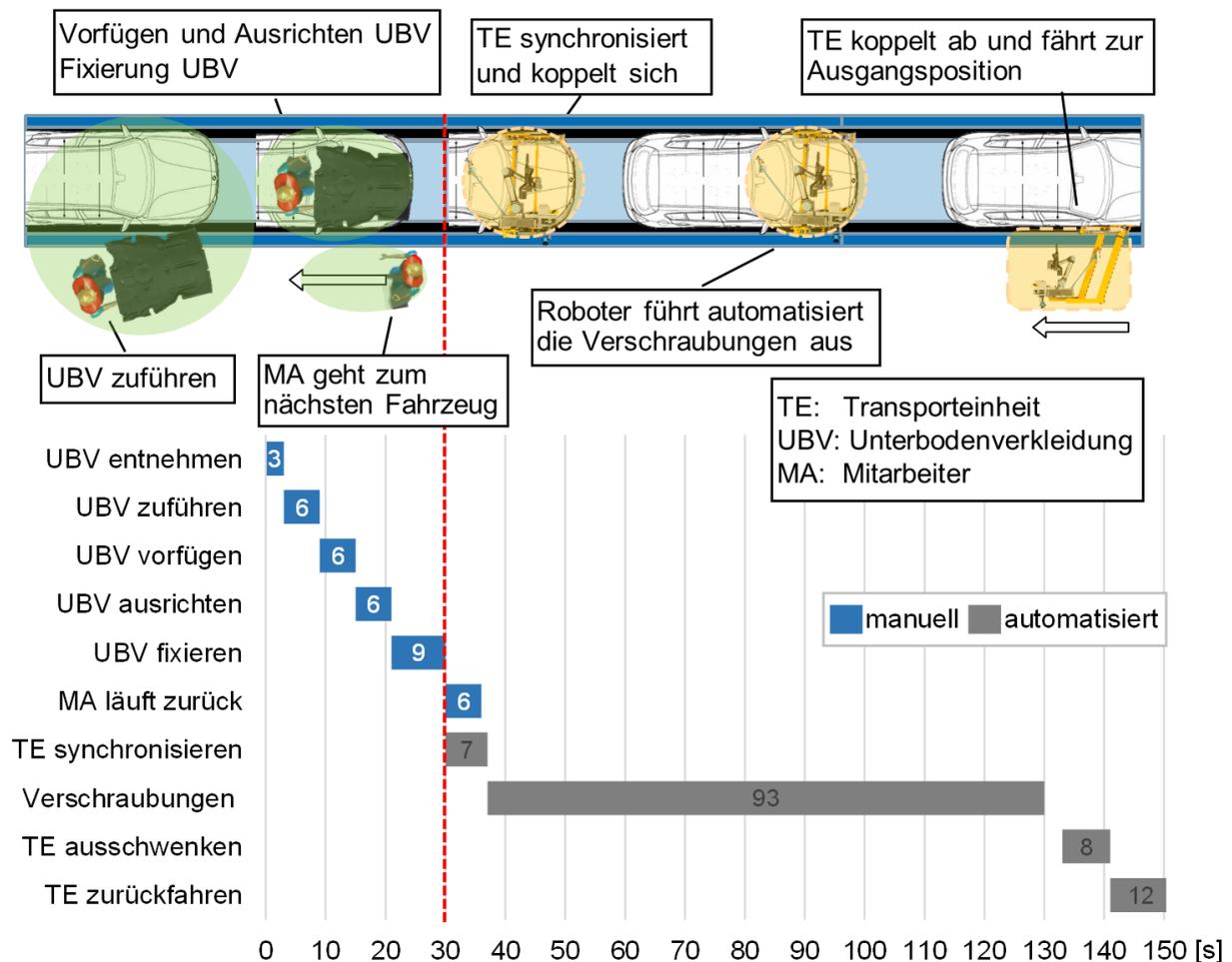


Abbildung 7.35: Ablauf des Gesamtprozesses und die Aufgabenteilung

Der Mitarbeiter führt die Verkleidung zu und schiebt sie in die Frontschürze ein. Anschließend richtet er die Verkleidung über den Schraubpunkten aus und setzt vier Schrauben manuell. Der Mitarbeiter verlässt dann den Arbeitsbereich und geht zum nächsten Fahrzeug. Im Anschluss übernimmt der Roboter die Verschraubung der restlichen Schrauben. In der zeitlichen Einteilung (Abbildung 7.35 unten) ist zu sehen, dass die manuellen Umfänge ungefähr 36 s benötigen und der automatisierte Prozess eine Gesamtdauer von ca. 120 s hat. Der Gesamtprozess benötigt somit eine Länge von ca. 2,5 Takten. Während des Vorfüge- und Schraubprozesses besteht die Möglichkeit weitere Tätigkeiten parallel Durchzuführen. Die Zusammensetzung der Zeitabschnitte des automatisierten Systems ist im nächsten Abschnitt beschrieben.

Ablauf des automatisierten Schraubprozesses

Die Transporteinheit wartet zu Beginn in ihrer Ausgangsposition auf das nächste Fahrzeug. Der Abstand zum Referenzblech am Fahrzeuggehänge wird über den Lasersensor angemessen. Ist ein eingestellter Abstandswert erreicht, wird der Antriebsmotor zur Synchronisation gestartet und die Regelung auf den vorgegebenen Synchronabstand aktiviert. Nach erfolgter Synchronisation wird die Ankopplung freigegeben und der Adaptiondorn ausgefahren. Wenn der Adaptiondorn im Fangbereich der Adaptionführung ist, wird die Ausgleichseinheit freigeschaltet. Nach erfolgter

Kopplung bekommt der Roboter die Freigabe. Der Roboter misst zunächst die Fahrzeughöhe ein und fährt anschließend auf die Vorposition der ersten Schraubstelle. Hier wird das 2,5 D Kamerasystem und die Ringbeleuchtung aktiviert und der Abstand zum Schraubpunkt bestimmt. Anhand des Abstandes wird nun das Schraubwerkzeug unterhalb der Schraubstelle positioniert und der Schraubprozess gestartet. Nach Abschluss der Verschraubung wird die Vorposition der nächsten Schraubposition angefahren und der Vorgang wiederholt, bis alle Verschraubungen durchgeführt wurden. Danach wird der Adaptionsdorn eingefahren und die Transporteinheit auf die Rückfahrposition ausgeschwenkt. Es erfolgt die Rückfahrt zur Ausgangsposition und ein Einschwenken in die Prozesslage des Systems. Der Gesamtprozess in einem Flowchart im Anhang III visualisiert.

Auf Grundlage der Ablaufplanung (Abbildung 7.35) wird der Prozess zur Durchführung von 22 Verschraubungen innerhalb von 120 s ausgelegt. Bei der branchenüblichen Taktzeit von 60 s und einer Taktlänge von 6 m entspricht die Fahrstrecke ca. 12 m im Fließbetrieb. Wesentliche Zeitbestandteile sind die Fahrzeit des Roboters, die Schraubzeit, die Rückfahrzeit der Transporteinheit, Nebenzeiten sowie die Detektions- und Ausrichtezeit unterhalb der Schraubstelle. Folgende Werte wurden angenommen:

- Die Gesamtfahrzeit des Roboters errechnet sich aufgrund der addierten Zeiten des Verfahrens zwischen den einzelnen Schraubpunkten. Es wurde eine Beschleunigung von 1 m/s^2 und $0,5\text{ m/s}$ Bahngeschwindigkeit gewählt.
- Die Schraubzeiten entsprechen gemessenen Werten des Schraubwerkzeuges sie beträgt im Mittel ca. $0,65\text{ s}$.
- Die Rückfahrt des Systems wird mit einer Geschwindigkeit von $1,2\text{ m/s}$ durchgeführt. Dieser Wert wird üblicherweise für fahrerlose Transportsysteme genutzt und soll einen sicheren Prozessablauf gewährleisten.
- Nebenzeiten sind das Ein- und Ausschwenken der Einheit, die Ankopplung sowie die Zeit zur Synchronisation.
- Die Zeit zur Detektion der Schraubstelle und Ausrichtung des Roboters wird im Versuch bestimmt. Als Vorgabewert wurde die restliche verfügbare Taktzeit zur Berechnung verwendet. Hierbei ergibt sich eine Zeit von $2,8\text{ s}$ pro Verschraubung.

Eine Umsetzung und Validierung der berechneten Werte erfolgt innerhalb der Erprobung im Gesamtsystem (Kapitel 7.6.2).

Absicherung des Arbeitsraumes

Bei der Durchführung des Schraubprozesses soll sich kein Mitarbeiter im Arbeitsraum des Roboters aufhalten. Da kein Schutzzaun vorhanden ist, kann ein Betreten des Arbeitsraumes jedoch nicht ausgeschlossen werden. Der Roboter stellt aufgrund kurzer Fahrwege zwischen den Schraubpunkten und der begrenzten Geschwindigkeit nicht die Hauptgefährdung in diesem Prozess dar. Vielmehr ist der Schraubvorgang eine Gefahr, da nicht ausgeschlossen werden kann, dass sich ein Körperteil zwischen

Schrauber und Verkleidung befinden könnte und somit eine Verletzungsgefahr besteht. Ein weiteres Risiko ist der Rückfahrprozess, wobei der Mitarbeiter mit den Transportarmen kollidieren könnte.

Um eine Absicherung vor diesen Gefahren zu ermöglichen, wird ein Sicherheitslaserscanner eingesetzt, welcher den Arbeitsraum des Roboters und bei der Rückfahrt den Fahrweg des Transportsystems überwacht. Die entsprechenden Bereiche sind in Abbildung 7.36 dargestellt.



Abbildung 7.36: Sicherheitskonzept und Sicherheitsbereiche

Während des Schraubprozesses wird der Sicherheitsbereich (Abbildung 7.36 links) unterteilt in einen Warnbereich, innerhalb dessen ein Warnsignal erfolgt und einen Sicherheitsbereich, innerhalb dessen der Prozess nicht fortgesetzt wird. Der Sicherheitsbereich wurde in seiner Größe so ausgelegt, dass beim Eintritt einer Person eine ausreichende Zeit zur Unterbrechung des Prozesses vorhanden ist. Bei der Rückfahrt wird ein Unterbrechungsbereich eingesetzt, welcher ein Anhalten der Rückfahrbewegung verursacht bis der Fahrbereich wieder frei ist (Abbildung 7.36 rechts). Die Auslegung erfolgte ebenfalls unter Berücksichtigung der Anhaltezeit und des Bremswegs des Transportsystems. Bei der Ein- und Ausschwenkbewegung des Transportsystems werden die Schwenkbereiche ebenfalls durch den Laserscanner überwacht.

Um die Synchronisation abzusichern wird die in Kapitel 6.6.3 beschriebene Abbruchroutine genutzt, um die Work List abubrechen und die Transporteinheit vom Fahrzeug abzukoppeln, wenn eine Asynchronität erkannt wird.

Nach der Konfiguration der Betriebsmittel und der Auslegung des Gesamtprozesses wird im folgenden Kapitel die Integration der Komponenten beschrieben.

7.5 Integration

Innerhalb dieses Kapitels wird die Integration der Komponenten zu einem Gesamtsystem dargestellt. Im ersten Unterkapitel wird hierzu die physische Integration der Kom-

ponenten zu einer modularen, einfach zu rekonfigurierenden Montagestation beschrieben. Im zweiten Unterkapitel wird die steuerungstechnische Integration der spezifizierten Komponenten unter Nutzung des CoRe-UI gezeigt.

7.5.1 Physische Integration als modularer Montageassistent

In Kapitel 6 wurde spezifiziert, dass der physische Aufbau der Anlage möglichst vollständig das modulare Grundprinzip berücksichtigen soll. Dies ist erforderlich, um eine einfache Austauschbarkeit von einzelnen Modulen zu ermöglichen und damit eine einfache Rekonfigurierbarkeit sicherzustellen. Die Integration der Anlage erfolgt daher als modularer Montageassistent, welcher für vielfältige Aufgaben in der Fließmontagelinie genutzt werden kann. Dieser besteht aus drei Hauptbestandteilen:

- **Transportsystem:**

Die Aufgabe des Transportsystems ist die Herstellung eines quasi-statischen Zustandes zwischen dem kontinuierlich bewegten Montageobjekt und den benötigten Betriebsmitteln zur Prozessausführung. Als universelles Transportsystem, welches an vielen Stellen in der automobilen Fließmontage genutzt werden kann, kommt die in Kapitel 7.4.1 beschriebene schwenkbare Transporteinheit zum Einsatz. Die Schienenlänge kann je nach Anwendungsfall und Bedarf verändert werden. Durch die Variation der Schienenhöhe und ihrer seitlichen Lage kann die Arbeitsposition der Prozesseinheit angepasst werden. Zur Aufnahme der Prozesseinheit sind entsprechende Bohrungen vorgesehen, mit denen eine schnelle Aufnahme und Wechseln möglich ist. In Abbildung 7.37 ist das Transportsystem ohne Prozesseinheit dargestellt und die Anbindungspunkte zur Prozesseinheit gezeigt.



Abbildung 7.37: Transportsystem und Anbindung der Prozesseinheit

- Medienflansch

Um bei einer Rekonfiguration oder einer Wartung einzelne Module des Systems wechseln zu können, wurde die Medienversorgung mittels einer modularen Schnittstelle realisiert. Am Transportsystem befindet sich ein so genannter Medienflansch, abgebildet in Abbildung 7.38. Durch die Verwendung einer derart gestalteten Schnittstelle ist es möglich, in kürzester Zeit Betriebsmedien wie Stromversorgung, Druckluft und Datenverbindungen anzuschließen oder zu trennen.

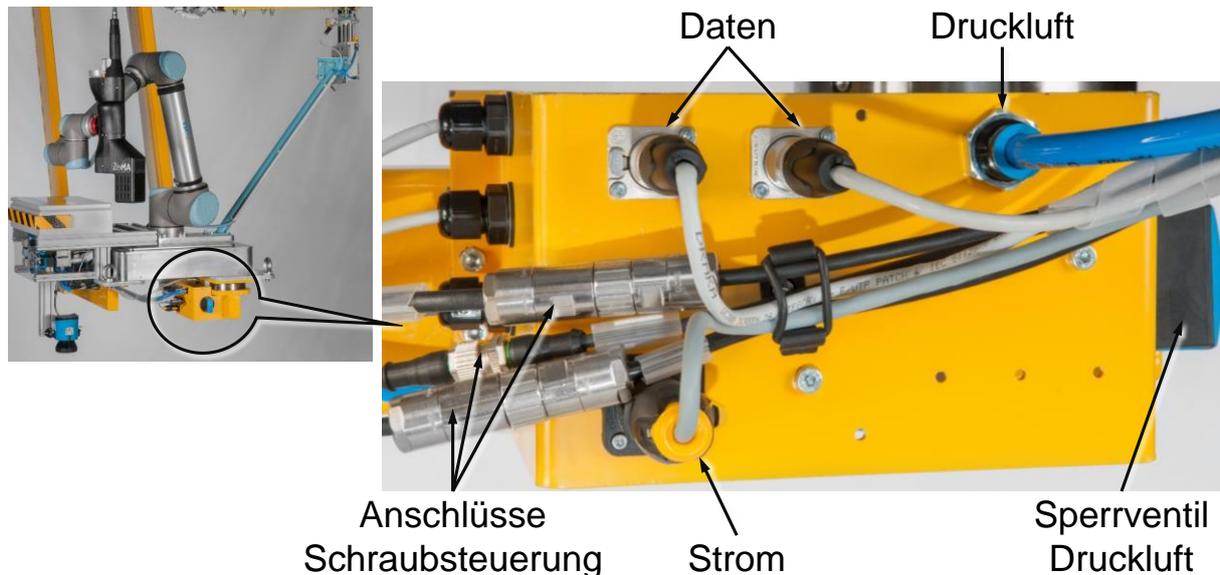


Abbildung 7.38: Medienflansch mit Anschlüssen

- Prozesseinheit

Die Prozesseinheit besteht aus den Komponenten, welche zum Durchführen des Montageprozesses notwendig sind. Hier wird das in Kapitel 7.4.1 beschriebene Ausgleichssystem genutzt, welches den Roboter mit seinen angeschlossenen Komponenten aufnimmt. Zusätzlich sind eine dezentrale Steuerung und die notwendigen Pneumatikventile an der Prozesseinheit angebracht. Dies ermöglicht eine schnelle Austauschbarkeit der Prozesseinheit, da lediglich eine Strom, Daten und Druckluftverbindung mit dem Medienflansch hergestellt werden muss. Die Medienzuführung über das Schienensystem muss hierbei nicht verändert werden. Die Verkabelung und die Pneumatikschlauchverlegung zu den einzelnen Komponenten sind innerhalb der Prozesseinheit realisiert. In Abbildung 7.39 ist die Prozesseinheit mit ihren Komponenten dargestellt.

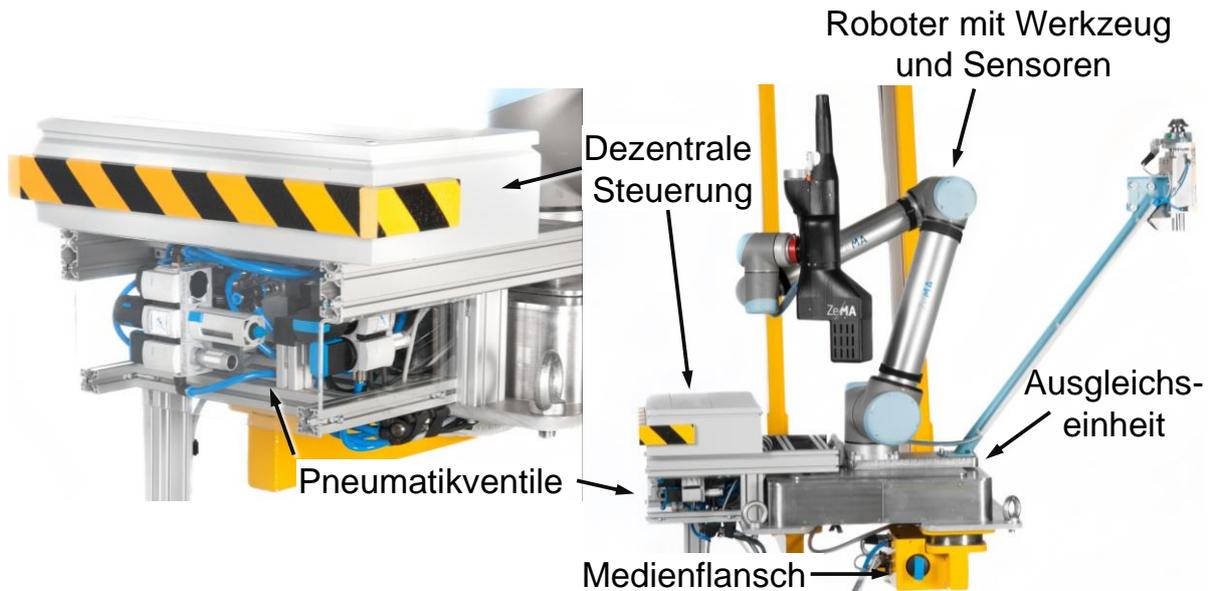


Abbildung 7.39: Prozesseinheit mit ihren Komponenten

Durch diese modulare Integration wird eine schnelle Rekonfiguration der Anlage ermöglicht. Ebenso vereinfacht es die Wartbarkeit und Inbetriebnahme. Die Prozesseinheit kann komplett vorbereitet, getestet und sehr schnell in die Anlage integriert werden. Im Falle einer Funktionsstörung ist ein rascher Austausch der Prozesseinheit möglich. Ebenso erhöht sich die Wiederverwendbarkeit, da bei Änderungen nur einzelne Komponenten ausgetauscht werden müssen. Zusammen mit dem entwickelten Steuerungskonzept und dem CoRe-UI soll dieser Aufbau dazu beitragen, dass die entwickelte Methodik übertragbar ist und in einer Vielzahl von automobilen Montageprozessen angewendet werden kann.

7.5.2 Steuerungstechnische Integration

In diesem Kapitel wird die steuerungstechnische Integration der Komponenten beschrieben.

Generieren der Bausteine und Integration in die Steuerung

Nachdem die Work List erstellt und die zugehörigen Modulusprägungen konfiguriert wurden, werden nun die zur Integration benötigten Datensätze generiert. Die Datensätze können im CoRe-UI für die Work List und die einzelnen Modulusprägungen in gleicher Art erstellt werden. In Abbildung 7.40 ist der Aufruf der Funktion zur Bausteingenerierung für die Work List „Start List“ dargestellt.

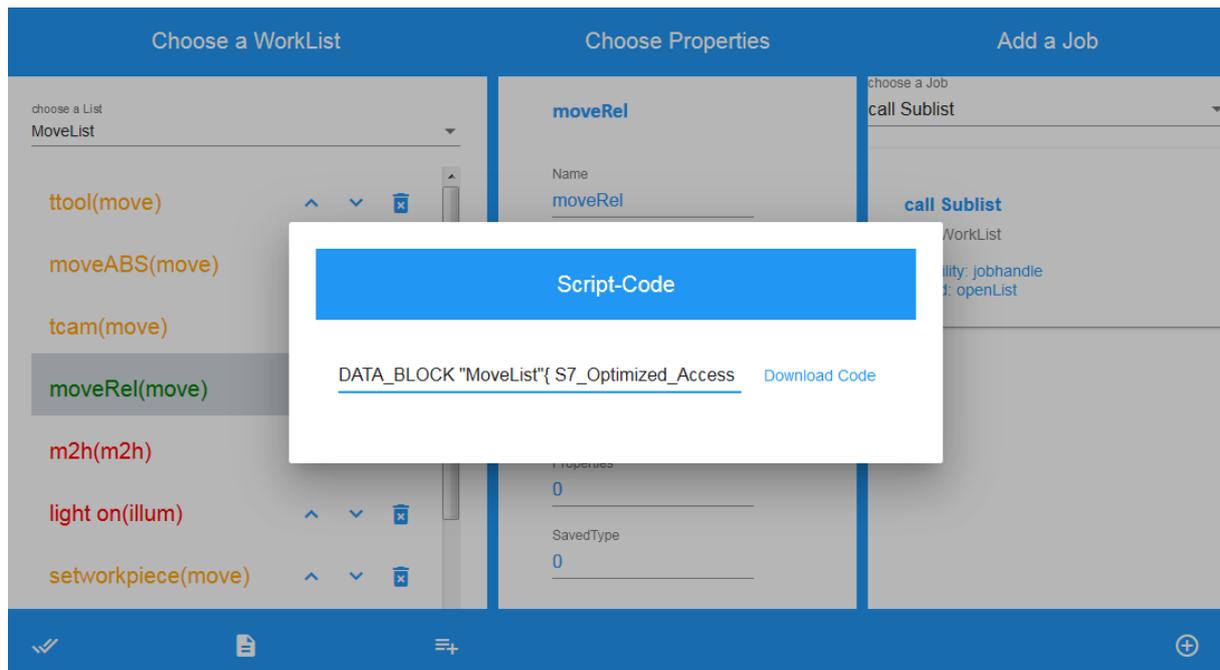


Abbildung 7.40: Aufruf der Funktion zur Bausteingenerierung

Es öffnet sich ein Download Fenster und der Datensatz kann vom Benutzer gespeichert werden.

Zur Steuerung des Prozessablaufes wird innerhalb der Validierung eine speicherprogrammierbare Industriesteuerung der Firma Siemens genutzt (Siemens S7-1500). Zur Integration der Bausteine in die Steuerung wird das zugehörige TIA Programmierportal verwendet. Hierzu werden die erzeugten Bausteine im Portal aufgerufen und die Funktion „Baustein aus Quelle“ generieren ausgeführt.

Steuerungstechnische Anbindung der Modulausprägungen und Methodenausführung

In folgender Abbildung ist die Struktur der Anbindung der einzelnen Komponenten dargestellt.

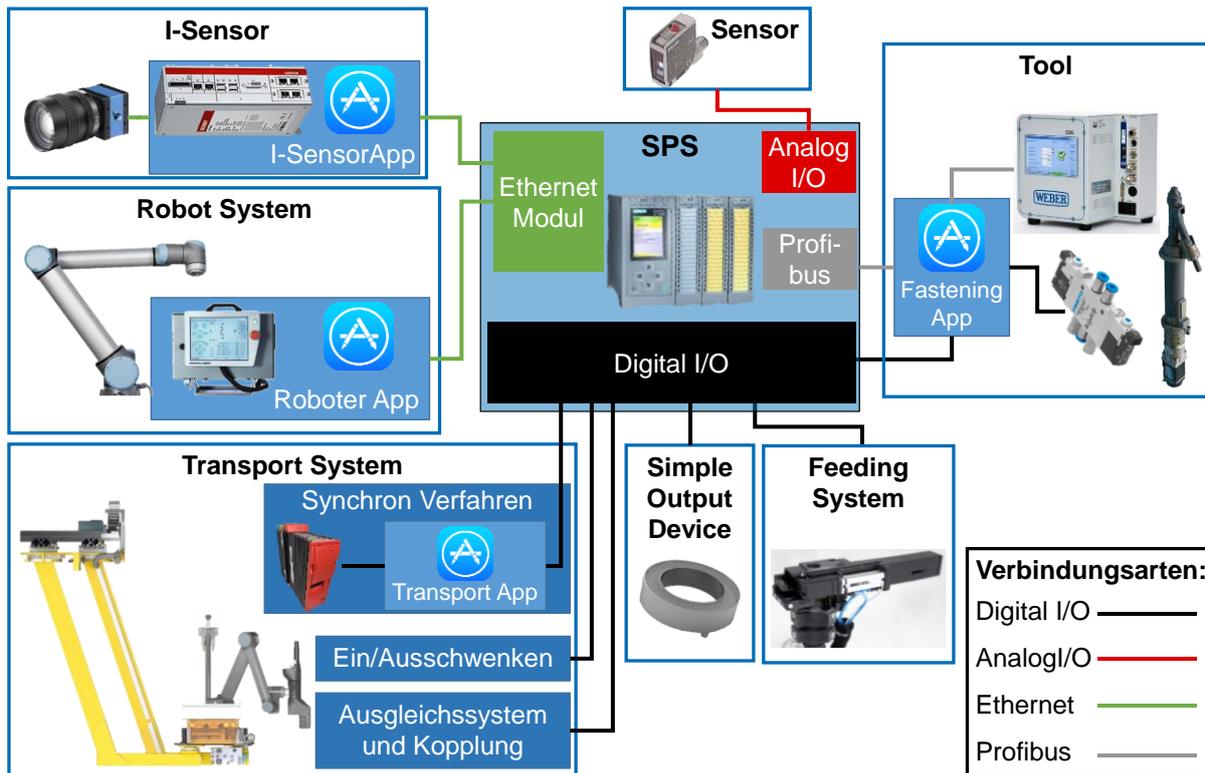


Abbildung 7.41: Struktur der Anbindung der einzelnen Komponenten

Zur Kommunikation der Modulausprägungen mit dem Steuerungskonzept werden Ethernet, Profibus, analoge und digitale I/O Anbindungen genutzt. Wie zuvor im Kapitel 6.5.2 und 6.6.4 beschrieben, werden bei Modulen mit eigener Steuerung Applikationen zur Ansteuerung verwendet. Die Ansteuerung der Komponenten im Detail und die Methodenausführung sind wie folgt umgesetzt:

Robot System

Die Koordinierung und Bahnplanung der Roboterbewegungen erfolgt mittels der Robotersteuerung des UR10. Diese ist über eine Ethernet-Verbindung mit der Steuerung verbunden. Zur Umsetzung der Befehle des Steuerungskonzeptes wird auf der Robotersteuerung die in Kapitel 6.6.4 beschriebene Roboter App eingesetzt.

Simple Output Device

Der Beleuchtungsring zur Ausleuchtung des Unterbodens während des Schraubprozesses wird über eine digitale I/O Ansteuerung aktiviert und deaktiviert. Hierzu wird die Basisklasse „Simple Output Device“ genutzt und die Instanz für den Anwendungsfall parametrisiert.

Sensor

Der Lasertriangulationssensor ist mit einer analogen Verbindung an die Steuerung angeschlossen. Der Abstandswert wird am Analogeingang der Steuerung als Stromwert gemessen. Dieser Wert wird in der Steuerung durch die Basisklasse „AnalogSensor“ zu einem Abstandswert umgewandelt und kann für weitere Funktionalitäten genutzt werden, bspw. die Messung der Schraubposition.

I-Sensor

Der I-Sensor verfügt über eine eigene Steuerung. Diese läuft auf einem Industrie PC. Zur Kommunikation mit der Steuerung über Ethernet wird eine I-Sensor App genutzt. Diese empfängt von der Steuerung den gemessenen Abstandswert des Sensors und liefert nach Durchführung des Bildverarbeitungsalgorithmus die gemessenen Abstandskordinaten an die Steuerung zurück.

Tool

Zur Ansteuerung des Schraubwerkzeuges wird eine steuerunginterne Fastening App im Steuerungskonzept eingesetzt. Diese ruft über ProfiBus auf der Schraubsteuerung die gewünschten Schraubprogramme auf. Ein Zugriff erfolgt ähnlich wie bei digitalen I/O Verbindungen durch vorgegeben Operandenbereiche der Schraubsteuerung. Zusätzlich startet die steuerunginterne App über eine digitale I/O Verbindung den pneumatischen Vorschub der Schraubspindel. Die Schraubsteuerung übermittelt durch deren Ausgänge den Zustand und die Ergebnisse des Schraubprozesses an die Fastening App. Dadurch kann die Steuerung den Schraubprozess auswerten und überwachen.

Feeding System

Die Schraubenzuführung wird pneumatisch durchgeführt. Die entsprechenden Pneumatikventile werden durch das Steuerungssystem über eine digitale I/O Verbindung angesteuert. Als Grundlage zur Ansteuerung wird die Basisklasse „Simple Output Device“ verwendet und die Instanz für den Anwendungsfall parametriert.

Transport System

Die Klasse Transporteinheit stellt eine Unterklasse der Klasse Transport System dar (Klassendiagramm siehe Anhang I). Die auszuführenden Jobs des Transportsystems werden nach dem Prinzip ihrer Ansteuerung in drei Bereiche aufgeteilt:

Synchron Verfahren

Die Transporteinheit verfügt zur Durchführung der Synchronisation über einen Sensor zur Positionsbestimmung und ein Attribut, welches den Synchronisationszustand angibt. Außerdem sind Methoden zur Überprüfung der Synchronität und zum Starten oder Beenden des Synchronisierungsprozesses vorhanden. Zur Statusbestimmung werden die internen Sensoren ausgewertet und verarbeitet.

Zur Interaktion mit der Steuerung des Antriebsmotors wird eine Transport App genutzt. Hierzu wurde eine Kommunikation über Ein- und Ausgänge geschaffen, welche eine Synchronisierung, einen Abbruch der Bewegung und eine Rückfahrt auf einen Ausgangspunkt auslösen. Die Kommunikation wird durch das Schalten von digitalen I/O ausgeführt. Die Regelung des Abstandes und der Drehzahl erfolgt in der Antriebssteuerung nach dem in Kapitel 7.4.1 beschriebenen Prinzip.

Ein- und Ausschwenken der Tragarme

Das Ein- und Ausschwenken der Tragarme erfolgt mittels eines pneumatischen Zylinders, die Verriegelung durch die Klemmung der Kolbenstange. Hierzu müssen zwei Ventile geschaltet werden, sodass ein Ein- und Ausschwenken und die nachfolgende Verriegelung sichergestellt sind. Dies erfolgt durch eine digitale I/O Ansteuerung der Ventile. Grundlage hierzu bilden die Basisklassen „Digital Sensor“ zur Abfrage der Endlagenschalter und „Simple Output Device“ zur Ansteuerung der Pneumatik. Die Instanzen dieser Basisklassen wurden für diesen Anwendungsfall parametrisiert und als Modul gekapselt. Zur Überwachung der Tragarmposition und der Klemmung der Verriegelung sind in der Klasse „Transporteinheit“ Attribute vorhanden. Über die Methode „ein-“ bzw. „ausschwenken“ wird die Verriegelung gelöst, anschließend die Tragarme ein- bzw. ausgeschwenkt und in der Endposition erneut verriegelt.

Ausgleichssystem und Kopplung

Der Ausgleich von Störeinflüssen wird durch das Ausgleichssystem übernommen. Dieses verfügt über mehrere Sensoren und Pneumatikzylinder. Die Ausgleichseinheit ist eine Unterklasse des Transportsystems und im Anhang I dargestellt.

Es sind Sensoren vorhanden, welche die Lage des Adaptionisdorns und die Auslenkung der Ausgleichsebene überwachen. Um die Ausgleichseinheit zu zentrieren, werden vier Pneumatikzylinder mit einem Ventil angesteuert. Dies geschieht wiederum über eine Instanziierung und modulare Kapselung der Basisklassen „Digital Sensor“ und „Simple Output Device“. Auch der Zentrierdorn kann pneumatisch ausgefahren werden und wird im gleichen Modul ebenso angesteuert. Zusätzlich zu den Endlagensensoren des Ausgleichssystems, welche bei voller Auslenkung eine fehlerhafte Synchronisierung melden, verfügt die Einheit über einen Sensor, welcher feststellt, ob der Zentrierdorn eine Kopplung mit dem Fahrzeug ausgeführt hat, bzw. im Fangbereich der des Ankopplungspunktes ist. Dieser Sensor basiert auf der Basisklasse „Analog Sensor“ und ist im Modul eingebunden. Wenn eine Kopplung durchgeführt wurde, wird die Ausgleichseinheit geöffnet.

Im nächsten Abschnitt wird gezeigt, wie mit dem CoRe-UI eine Prozessübersicht und -führung umgesetzt wurde.

7.5.3 Umsetzung der Prozessführung

Um dem Mitarbeiter Informationen und eine Übersicht über den laufenden Prozess zu ermöglichen, wurde im CoRe-UI ein Prozess Monitor umgesetzt. Dies ist in Abbildung 7.42 zu sehen.

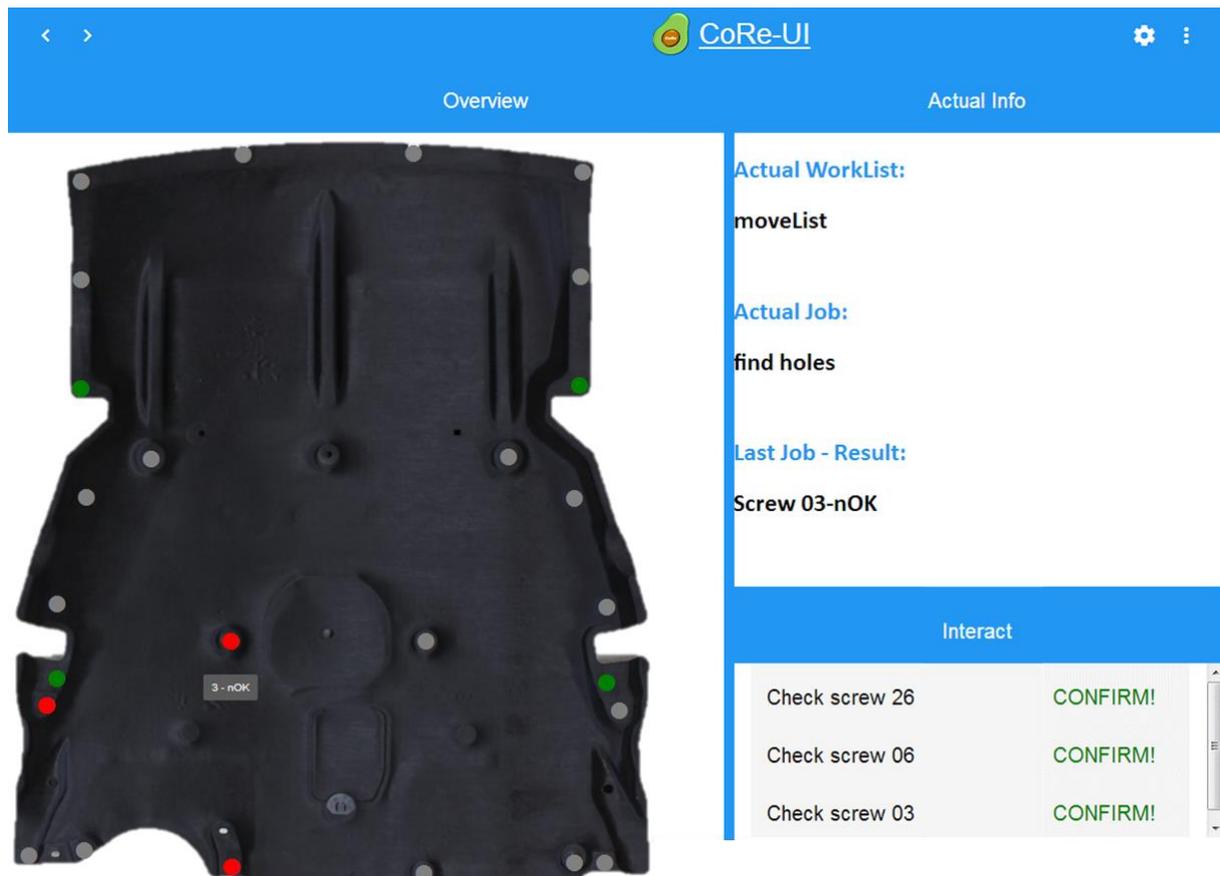


Abbildung 7.42: Umsetzung der Prozessführung im CoRe-UI

Auf der linken Seite ist die Unterbodenverkleidung mit den Schraubpunkten zu sehen. Noch nicht bearbeitete Schraubpunkte sind grau hinterlegt. Grüne Punkte sind Verschraubungen, die mit korrekten Parametern gesetzt wurden. Rote Punkte bedeuten nicht gesetzte Schrauben oder Verschraubungen, bei denen die vorgegebenen Parameter nicht eingehalten wurden. Die hierzu benötigten Informationen werden vom I-Sensor geliefert, um sicherzustellen, an welcher Position verschraubt wurde. Die Schraubparameter werden wie in 7.5.2 beschrieben von der Schraubsteuerung an das Steuerungskonzept übertragen.

In der rechten Spalte werden der aktuell ausgeführte Job, die aktuell ausgeführte Work List und der Status des zuletzt ausgeführten Jobs abgebildet. Darunter befindet sich ein Feld zur Interaktion. So können Nachrichten angezeigt und Eingaben durch den Bediener bestätigt werden. Als Beispiel werden hier die n.i.O. Schraubpunkte angezeigt, welche nachgearbeitet werden müssen

Mit Hilfe dieses Prozessmonitors kann der Mitarbeiter jederzeit den aktuellen Status des Systems verfolgen und bei Bedarf eingreifen. Ebenso können die generierten Informationen zur Qualitätsdatenerfassung genutzt oder in einer späteren Nacharbeitsstation aufgerufen werden, um fehlerhafte Verschraubungen zu korrigieren.

Nach der erfolgten Integration wird im nächsten Kapitel der Aufbau der Prozessstation in der Demonstratorfabrik beschrieben und eine Validierung des Ablaufs durchgeführt.

7.6 Erprobung im Gesamtsystem

Zur praktischen Validierung wurde der geplante Montageprozess der Unterbodenverschraubung in einem Realaufbau umgesetzt. Ziel ist ein Test der Methodik unter möglichst realistischen Industriebedingungen, um die Tauglichkeit in der Praxis sicherstellen zu können. Hierzu wurde die Prozessstation in eine Demonstratorfabrik integriert. Diese wird im Folgenden näher beschrieben.

7.6.1 Gesamtaufbau in der Demonstratorfabrik

Die Demonstratorfabrik wurde geschaffen, um Montage- und Inbetriebnahmeprozesse der Automobilproduktion realitätsnah darstellen und erproben zu können. Sie besteht auf einer Länge von 42 Metern wie in Abbildung 7.43 gezeigt, aus fünf Takten mit Stahlbau, einer Elektrohängebahn mit zwei Fahrzeuggehängen und einem Skid Fördersystem über drei Takte. Skid und Stahlbau überlappen in einem Übergabetakt. Hiermit ist es möglich, fast alle gängigen Montageprozesse der Automobilproduktion abdecken zu können, ausgehend vom Trim über Chassis und den Final Bereich. Abmessungen des Fahrbereiches, Werkerbereichs und des Materialanstellstreifens sind ebenfalls gleich wie in einer OEM-Produktionslinie.



Abbildung 7.43: Gesamtaufbau der Demonstratorfabrik

Der gesamte Aufbau besteht aus Komponenten, welche üblicherweise in der Industrie verwendet werden, um unter realitätsnahen Bedingungen die Forschungsergebnisse erproben und validieren zu können. Die technologische Reife sowie die erreichbare Qualität der erforschten Montageprozesse ist somit wesentlich höher im Vergleich zu einer modellhaft verkleinerten oder rein virtuellen Darstellung. Durch die Verwendung modularer Aufnahmen können unterschiedliche Fahrzeuge sehr schnell integriert werden.

Darstellung des entwickelten Prozesses in der Demonstratorfabrik

Der Prozess der Unterbodenmontage ist wie in Abbildung 7.44 dargestellt innerhalb von 2 Takten der Demonstratorfabrik über eine Länge von 12 Metern aufgebaut.



Abbildung 7.44: Prozessstation der Unterbodenmontage

Die Umsetzung erfolgte mit den in Kapitel 7.4 spezifizierten Modulausprägungen. Die physische Integration entspricht dem in Kapitel 7.5 vorgestellten modularen Montageassistenten, ebenso wie die steuerungstechnische Umsetzung. Innerhalb dieses Aufbaus wurde der entwickelte Prozess unter praxisnahen Bedingungen getestet. Dies wird im folgenden Kapitel beschrieben.

7.6.2 Validierung des Prozessablaufs

Die Validierung des Prozessablaufs erfolgte in zwei Stufen. Zunächst wurde wie in Abbildung 7.45 zu sehen ein stationärer Aufbau durchgeführt, welcher das Robotersystem mit dem Werkzeug und allen Sensoren, sowie das Ausgleichssystem umfasst.

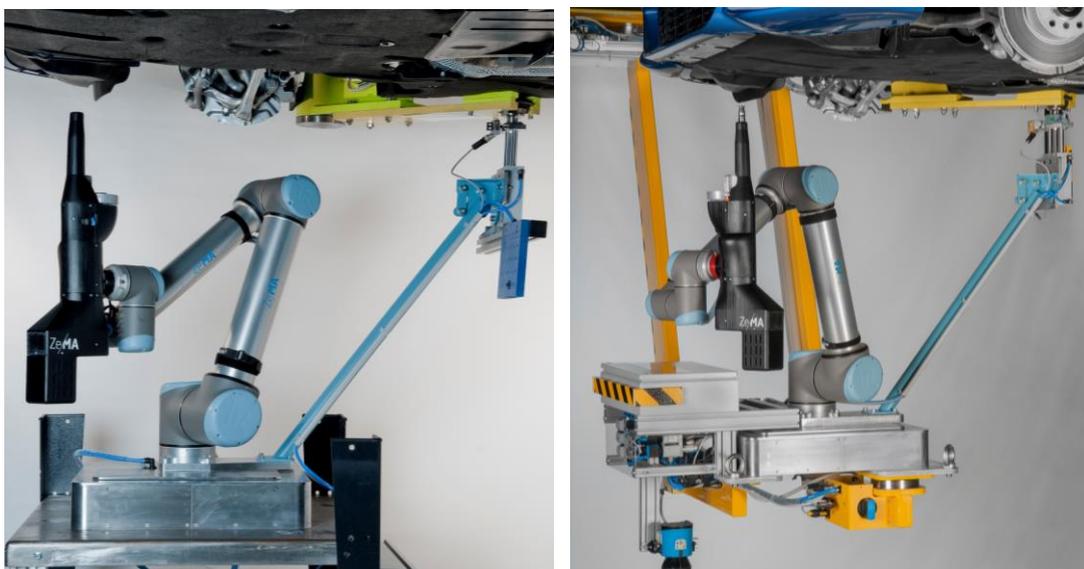


Abbildung 7.45: Validierungsstufen des Prozessablaufs

Hiermit wurde das Ankoppeln, die Ausgleichseinheit sowie der Schraubprozess getestet. Nachdem die Erfassung der Schraubpunkte mit der Kamera und die Berechnung des Algorithmus zuverlässig funktionierten und der Schraubprozess optimal eingestellt war, wurde im zweiten Validierungsschritt das Transportsystem entwickelt, konstruiert und integriert. Dies ist in Abbildung 7.45 auf der rechten Seite zu sehen. Innerhalb der Validierung konnte der Prozess im Fließbetrieb erfolgreich durchgeführt werden. Die Synchronisation, das Ankoppeln, der Schraubprozess und das Abkoppeln mit Rückfahrt wurden umgesetzt.

Das CoRe-UI wurde über ein Industrietablet aufgerufen und die Test- und Inbetriebnahmefunktionen wurden während des Aufbaus genutzt. Der in Kapitel 7.5.3 vorgestellte Prozessmonitor wurde ebenfalls auf dem Tablet dargestellt und kann zur Prozessüberwachung eingesetzt werden.

Die in Kapitel 7.4.3 geplanten Prozesszeiten lassen sich im Versuch bestätigen. Die Detektionszeit des Kamerasystems etwas niedriger als prognostiziert. Die benötigten Nebenzeiten sind höher als vorab berechnet und weisen noch weiteres Optimierungspotenzial durch Parallelisierung und Optimierung der Verfahrbewegungen auf. Unter Berücksichtigung der vorhandenen Optimierungspotenziale bei den Nebenzeiten kann davon ausgegangen werden, dass eine praktische Implementierung innerhalb von 2 Takten zur Durchführung von 22 Verschraubungen mit einer Taktzeit von 120s als realistisch angesehen werden kann.

Somit wurden alle innerhalb des Validierungskapitels beschriebenen Systemelemente umgesetzt und getestet. Im folgenden Kapitel erfolgt eine Zusammenfassung der Validierung und eine Ergebnisbewertung.

7.7 Zusammenfassung und Bewertung der Validierung

Der Ablauf der Validierung der Methodik wird im Folgenden zusammengefasst und Anschließend wird eine Bewertung des Validierungsergebnisses vorgenommen.

Zusammenfassung

Innerhalb der Validierung wurden alle Einzelschritte der Methodik an einem Praxisbeispiel erprobt und eine Montageanlage umgesetzt.

Zunächst wurde mit der Auswahl eines Validierungsszenarios aus der Automobilmontage begonnen. Hier wurde als besonders kritischer Prozess die Unterbodenmontage identifiziert. Bei einer Analyse wurde das Potenzial dieses Montageprozesses zur Umsetzung einer hybriden Montageanlage in Form einer Mensch-Roboter-Kooperation aufgezeigt. Hierbei ist unter anderem die sehr nachteilige Ergonomie der durchzuführenden über Kopf Montageprozesse beschrieben worden.

Die Montage der Unterbodenverkleidung unterhalb des Motors wurde aufgrund der Vielzahl an Schraubstellen als Validierungsszenario ausgewählt. Hierzu wurden die relevanten Grobplanungsdaten ermittelt und eine Analyse der relevanten Bauteile und ihrer Anforderungen an den Montageprozess durchgeführt.

Mittels dieser Daten wurde eine Verantwortlichkeitsstruktur des Prozesses erstellt. Diese diente als Grundlage, um den prozeduralen Arbeitsablauf zu planen und eine Aufgabenzuordnung vorzunehmen. Der so erstellte optimierte Prozess wurde beschrieben und hinsichtlich der durch die Optimierung erreichten Verbesserungspotenziale bewertet. Hier konnte gezeigt werden, dass durch die Optimierung die ergonomische Belastung für den Mitarbeiter bedeutend reduziert und ebenso eine Kostensparnis und Qualitätsverbesserung realisiert werden kann.

Zur Umsetzung des Prozesses wurde eine Planung des Arbeitsablaufes unter Berücksichtigung der festgelegten Aufgabenverteilung durchgeführt und eine Arbeitsraumplanung erstellt. Es folgte die Ausgestaltung des automatisierten Systemteils.

Hierzu wurde eine Work List der durchzuführenden Aufgaben erstellt und auf Basis der geforderten Unterverantwortlichkeiten die benötigten Modulklassen bestimmt. Zu jeder Modulkategorie wurde unter Nutzung des Konfigurators des CoRe-UI eine Auswahl der benötigten Modulausprägungen getroffen. Detailliert beschrieben wurden die entwickelten Detaillösungen zur Umsetzung des Transportsystems mittels schwenkbarer Transporteinheit. Als Ergebnis steht eine Auswahl aller benötigten Betriebsmittel zur Umsetzung.

Die so erhaltene Konfiguration wurde anhand der in Kapitel 6.4 beschriebenen Bewertungskriterien evaluiert. Es wurde sowohl die technische Machbarkeit mittels Simulationen abgesichert, als auch die wirtschaftlichen Vorteile durch eine Investitionsrechnung gezeigt. In einer beispielhaften Rechnung wurde eine Amortisationsdauer von 1,9 Jahren bestimmt. Ebenso wurde beschrieben, dass die überwiegende Zahl der Varianten mit der gewählten Konfiguration abgedeckt werden können.

Nach der Finalisierung der Konfiguration wurde eine Beschreibung des geplanten Arbeitsablaufes der automatisierten Anlage unter Berücksichtigung der konfigurierten Betriebsmittel vorgenommen. Die einzelnen Vorgänge wurden detailliert beschrieben und eine zeitliche Kalkulation des Prozesses durchgeführt. Hierzu wurden relevante Prozessparameter ausgewählt. Ebenso wurde das Sicherheitskonzept zur Absicherung der Anlage beschrieben.

Anschließend erfolgte die Integration der Komponenten. Im Zuge der physischen Integration wurde das Konzept des modularen Montageassistenten beschrieben, welcher es ermöglicht das modulare Konzept im Anlagenaufbau zu berücksichtigen und die geforderte Rekonfigurierbarkeit gestattet. Die steuerungstechnische Integration wurde anhand der Generierung von Datensätzen und dem Steuerungsexport durch das CoRe-UI beschrieben. Ebenso dargestellt sind die steuerungstechnische Anbindung der Modulausprägungen und die Funktionsausführung. Hierzu sind die einzelnen Betriebsmittel mit der Art ihrer Ansteuerung aufgelistet und es wurde beschrieben wie die benötigten Methoden ausgeführt werden. Zur Umsetzung der Prozessführung wurde die Ausgestaltung der Prozessführung mittels des CoRe-UI beschrieben und gezeigt wie der Prozess überwacht und Nutzereingaben getätigt werden können.

Am Ende des Kapitels wurde die Erprobung im Gesamtsystem beschrieben. Der Gesamtaufbau der Demonstratorfabrik wurde dargestellt, innerhalb dessen die Validierung durchgeführt wurde. Im letzten Abschnitt wurde die Vorgehensweise bei der Validierung des Prozessablaufes ausgehend von einem stationären Aufbau zur Umsetzung der kompletten Anlage im Fließbetrieb erläutert.

Bewertung des Validierungsergebnisses

Zur Bewertung des Validierungsergebnisses wird die Erfüllung der in Kapitel 4.1 definierten Anforderungen durch die Methodik beurteilt.

1. Durchgängigkeit von Prozessplanung bis zur techn. Realisierung und Ausführung

Innerhalb der Validierung wurde der Prozess der angepassten Automatisierung der Unterbodenmontage von Grund auf neu entwickelt. Es zeigt sich, dass durch das einheitliche Beschreibungsmodell des Prozesses ausgehend von der Aufgabenbeschreibung in einer Verantwortlichkeitsstruktur über die Prozessplanung mit Arbeitsablaufplanung, Aufgabenzuteilung und der folgenden Erstellung der Work List mit den benötigten Modulklassen eine durchgängige Planung erreicht werden kann. Diese wird ohne Brüche in die Anlagenkonfiguration und die spätere Integration überführt. Insbesondere durch die Unterstützung der Konfiguration mittels des CoRe-UI und der Integration in das Steuerungskonzept ist eine einheitliche Datenstruktur sichergestellt.

2. Lösungsneutraler Systementwurf mit Struktur der benötigten Verantwortlichkeiten

Die zuvor entwickelte Vorgehensweise zur Beschreibung eines lösungsneutralen Systementwurfes wurde innerhalb der Validierung angewandt. Das Ergebnis dieses Schrittes wurde als Grundlage genutzt, um eine systematische Aufgabenbeschreibung und Aufgabenzuteilung vorzunehmen.

3. Modularisierungskonzept

Zur Umsetzung des Validierungsprozesses wurden alle Modulklassen des zuvor definierten modularen Baukastens genutzt. Es zeigt sich, dass die gewählten Module innerhalb der Planung vorteilhaft genutzt werden können und eine sinnvolle Aufteilung der Anlage anhand der Modulstruktur möglich ist.

4. Vorgehensweise zur Modulkonfiguration

Das entwickelte Datenmodell und die Möglichkeit der Zuordnung der von den Jobs benötigten Capabilities und Dienste zu den Fähigkeiten und Methoden der Modulausprägungen erlaubt eine direkte Verknüpfung der Prozessplanungsdaten mit den zur Ausführung benötigten Betriebsmitteln. In der praktischen Umsetzung wird die Modulkonfiguration wie bereits zuvor beschrieben durch das CoRe-UI unterstützt und vereinfacht.

5. Vorgehensweise zur techn. Lösungsfindung basierend auf Modulen

Wie vorhergehend dargestellt kann, insbesondere unter Nutzung der Konfigurationsoberfläche im CoRe-UI, eine einfache Auswahl der technischen Lösungen erfolgen. Hierzu werden die bereits zuvor erwähnten geforderten Dienste genutzt, ebenso wie

die in der Prozessplanung definierten technischen Parameteranforderungen. Innerhalb der Umsetzung hat sich diese Vorgehensweise als sinnvoll und hilfreich erwiesen insbesondere durch die Möglichkeit der Filterung der technischen Parameter innerhalb der Konfiguration und der transparenten Übersicht der verfügbaren Lösungsalternativen.

6. Integrationskonzept

Die automatisierte Generierung der Datensätze unterstützt eine Integration der Konfiguration und Work Lists in die Steuerung. Somit wird die Übertragung der Planungsdaten in die technische Umsetzung ohne tiefgreifende Programmiererfahrung ermöglicht. Der praktische Aufbau als modularer Montageassistent ermöglicht zudem eine einfache Integration der Komponenten in die Anlage. Etwas unkomfortabel stellt sich in der bisherigen Ausführung das manuelle Laden der Bausteine der Steuerung im Programmierportal der Steuerung dar (Vgl. 7.5.2). Die eigentliche Integration funktioniert jedoch problemlos. Teilweise sind spezifische Parametrierungen erforderlich (bspw. IP-Adresse) weitere Parameter können verändert werden oder sind durch Default Werte vorgegeben. Bei der erstmaligen Erstellung von Bausteinen für eine Modulkategorie muss darauf geachtet werden, dass sie einer einheitlichen Beschreibung entsprechen, ansonsten können sie durch das Steuerungssystem bei der Initialisierung nicht erkannt werden.

7. Steuerungs- und Ausführungskonzept

Das entwickelte Steuerungskonzept wurde auf eine üblicherweise genutzte speicherprogrammierbare Steuerung übertragen und zur Prozessausführung genutzt. Die Nutzung eines standardisierten Steuerungskonzeptes mit der Möglichkeit zur Selbstidentifikation konnte erfolgreich getestet werden, ebenso wie die dynamische Aufgabenzuweisung im Prozessablauf. Innerhalb der verwendeten Steuerung ist eine objektorientierte Programmierung standardmäßig nicht vorgesehen, was die Implementierung und Weiterentwicklung erschwert hat. Zudem werden keine Debugging-Funktionen unterstützt, weshalb sich die Fehlersuche als kompliziert erweist.

8. Berücksichtigung der Rekonfigurierbarkeit und variable Ausgabenausführung

Durch die konsequente Umsetzung der verwendeten Modulausprägungen als Datensatz in Verknüpfung mit der physischen Realisierung kann eine klare Unterteilung der Anlage in Einzelkomponenten vorgenommen werden und eine einfache Rekonfiguration ist möglich. Dies wird ebenso unterstützt durch den modularen Anlagenaufbau. Die variable Aufgabenausführung wird durch die Struktur der Work List sichergestellt, welche im Prozessablauf flexibel ausgetauscht werden kann. Dies ermöglicht eine einfache Änderung der Aufgaben und eine schnelle Anpassung z. B. auf unterschiedliche Varianten.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass alle geforderten Anforderungen durch die Methodik erfüllt werden. Innerhalb der Validierung konnte die Methodik und die entwickelten Systemelemente erfolgreich anhand einem realen Prozess implementiert und unter realitätsnahen Bedingungen in der Demonstratorfabrik getestet werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es, eine Vorgehensweise zu entwickeln, um das Potenzial angepasster Automatisierungsprozesse in der Automobilmontage zu nutzen. Dies soll zu einer Verbesserung der Produktivität und Qualität unter gleichzeitiger Gewährleistung von Flexibilität und Wandlungsfähigkeit führen. Hierzu wurde eine Methodik aufgebaut, welche einen durchgängigen Prozess ausgehend von der Montageplanung bis zur technischen Realisierung beschreibt. Ein einheitliches Datenmodell ermöglicht hierbei die Zuordnung der Verantwortlichkeiten des geplanten Prozesses zu ausführbaren Methoden der Betriebsmittel, die aus einem modularen Baukasten konfiguriert werden. Bei der Implementierung werden diese Betriebsmittel als gleichsinnige konstruktive (physische) und steuerungstechnische (cyber) Komponenten integriert, was eine einfache Rekonfiguration der Anlage ermöglicht. Die Beschreibung der Arbeitsaufgaben des Systems als ablaufbasierte Work List ermöglicht zudem eine flexible Anpassung der durchzuführenden Prozessschritte. Zur praktischen Nutzung der Methodik wurde ein Softwaresystem und ein Steuerungskonzept umgesetzt, um die Konfiguration und Inbetriebnahme softwaretechnisch zu unterstützen und den Prozessablauf in einer einheitlichen Steuerungsarchitektur durchzuführen. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine deutliche Vereinfachung der Anlagenplanung, da eine aufwendige Implementierung und Programmierung durch die Kombination wiederverwendbarer, in sich funktionsfähiger Module ersetzt wird, welche ausschließlich parametrisiert werden müssen.

Zum Aufbau der Methodik wurden zunächst die Grundlagen des Betrachtungsbereiches erläutert. Hierzu wurden die Leitgedanken und Prinzipien der Wandlungsfähigkeit und angepassten Automation definiert. Im Anschluss erfolgte die Vorstellung verschiedener Vorgehensmodelle aus der Softwareentwicklung, Mechatronik und des klassischen Maschinenbaus zur Anforderungsbeschreibung und dem Systementwurf. Innerhalb dieser Konzepte wird die zu erfüllende Gesamtverantwortlichkeit des Systems in Unterverantwortlichkeiten aufgeteilt. Diese werden durch interdisziplinär entwickelte Einzelmodule erfüllt. Hierzu wurde der Begriff Modularität beschrieben und Prinzipien zur Definition mechatronischer Module dargestellt. Zur Implementierung dieser Prinzipien werden modulare und objektorientierte Ansätze der Anlagensteuerung gebraucht, welche beschrieben und bewertet wurden.

Das Fazit der Betrachtung war, dass wandlungsfähige und angepasste Montagesysteme notwendig sind, um den Ansprüchen einer modernen Fahrzeugproduktion gerecht zu werden. Bei den komplexen Prozessen der Automobilendmontage sind vollautomatisierte Anlagen häufig nicht sinnvoll und kostendeckend einsetzbar. Aus diesem Grund sind angepasst automatisierte Prozesse mit einer fähigkeitsbasierten Aufgabenteilung erforderlich.

Relevante Forschungsansätze im Themenfeld der Arbeit wurden im Folgenden dargestellt. Hierbei ist der gesamte Ablauf der Anlagenplanung ausgehend von der Planung wandlungsfähiger Systeme über die Prozessplanung und Aufgabenzuordnung bis zum

Engineering und der Steuerung modularer Produktionsanlagen betrachtet worden. Zusätzlich wurden bestehende praktische Anwendungen und Applikationen diskutiert. Es erfolgte ein Abgleich bestehender Ansätze mit den relevanten Teilaspekten der Arbeit. Ergebnis war, dass eine durchgängige Planung in den bestehenden Ansätzen nur unzureichend berücksichtigt und umgesetzt ist. Die Schnittstelle zwischen Planung und technischer Realisierung sowie Implementierung ist bisher nicht detailliert untersucht worden. Ein weiterer Schwachpunkt bestehender Ansätze ist eine fehlende Vorgehensweise zur Definition einer technischen Lösung und der flexiblen Aufgabenanpassung.

Im nächsten Schritt wurden basierend auf dem identifizierten Handlungsbedarf Anforderungen an die Methodik abgeleitet. Es wird eine durchgängige Planung unter Nutzung eines lösungsneutralen Systementwurfes und der Konfiguration der Anlage basierend auf einem Modularisierungskonzept gefordert. Ebenso ist eine Vorgehensweise zur Integration und ein Steuerungs- und Ausführungskonzept notwendig.

Auf Grundlage der Anforderungen erfolgten die Konzeption der durchgängigen Methodik und die Einordnung in den Planungsprozess einer Montageanlage. Hierzu wurde zunächst das Vorgehen zur Bestimmung der prozessrelevanten Hauptmerkmale ausgehend von einer Anforderungsdefinition und Systemanalyse beschrieben. Darauf folgt der Ablauf des Systementwurfs. Dieser resultiert in einer lösungsneutralen Beschreibung der Verantwortlichkeiten. Es schließt sich die Prozessplanung und -ablaufgestaltung an. Hier wird dargestellt, wie die Aufgaben und der Arbeitsraum aufgeteilt werden können. Ergebnis ist eine Aufgabenliste des automatisierten Systems mit den zugehörigen Unterverantwortlichkeiten und des zugewiesenen Arbeitsraums.

Um ausgehend vom Systementwurf effizient den Prozessablauf umsetzen und zugehörige technische Lösungen bestimmen zu können, wurde ein Konfigurations- und Integrationskonzept entwickelt. Begonnen wurde mit der Struktur der zur Steuerung des Prozessablaufes genutzten Work List. Diese enthält ablaufbasiert alle Unterverantwortlichkeiten, die durch das automatisierte System erfüllt werden müssen und im Systementwurf definiert wurden. Zur Erfüllung der Verantwortlichkeiten wurde ein Modularisierungskonzept entwickelt. Es wurde zunächst bestimmt welche Modulklassen benötigt werden. Diese stehen in einem Baukasten zur Verfügung und können entsprechend ihrer verfügbaren Methoden zur Erfüllung der Unterverantwortlichkeit ausgewählt werden. Die technische Realisierung erfolgt durch die Auswahl einer Modulausprägung innerhalb der Klasse, welche in der Lage ist sowohl die Verantwortlichkeit als auch die technischen Anforderungen zu erfüllen.

Die physische Integration wird durch den Aufbau der gewählten Komponenten in der Prozessionsstation realisiert. Die steuerungstechnische Umsetzung erfolgt durch Integration von Datensätzen in das Steuerungssystem, welche bei der Modulkonfiguration erzeugt wurden. Das System ist in der Lage auf Grundlage der eingefügten Datensätze eine Selbstidentifikation durchzuführen und konfiguriert sich selbstständig. Zur Aufgabendurchführung wird die Work List geladen. Das Steuerungssystem gleicht diese mit

der verfügbaren Konfiguration ab und führt die Aufgaben aus, wenn alle Verantwortlichkeiten durch die eingefügten Module erfüllt werden. Die Aufgabenverteilung erfolgt nach dem serviceorientierten Architekturmuster. Datenverbindungen zu den Einzelkomponenten werden durch geräteunabhängige Standardapplikationen ermöglicht. Zur Beschreibung der Systemelemente wird ein einheitliches Datenmodell genutzt, welches die Fähigkeiten, Planungs- und Steuerungsattribute sowie die ausführbaren Methoden enthält und eine Zuordnung der Verantwortlichkeiten zu den Methoden der Modulausprägungen ermöglicht.

Um eine Durchgängigkeit und Konsistenz der Daten zu erreichen, wurde die Komposition von Diensten in der Work List und die Konfiguration von Modulen in einer Software umgesetzt. Hiermit kann der Planungs- und Integrationsprozess ohne tiefgreifende Programmierkenntnisse durchgeführt werden. Die Steuerung der Anlage erfolgt durch ein Steuerungskonzept, welches in einer standardmäßig genutzten speicherprogrammierbaren Steuerung verwendet werden kann.

Durch diesen Aufbau ist eine flexible (Re-)Konfiguration möglich, indem die physischen Komponenten getauscht werden und der entsprechende Datensatz implementiert wird. Eine variable Aufgabendurchführung ist durch den Wechsel der Work List möglich.

Nun erfolgte eine praktische Validierung der Methodik an dem Prozess der Montage der Unterbodenverkleidung eines Fahrzeuges. Alle Einzelschritte der Methodik wurden angewandt und ausgehend von der Analyse wurden ein Montageprozess und die zugehörige Anlage entwickelt. Es zeigte sich, dass die zuvor definierten Anforderungen durch die Methodik erfüllt werden. Innerhalb der Validierung konnte die Methodik und die entwickelten Systemelemente erfolgreich anhand einem realen Prozess implementiert und unter realitätsnahen Bedingungen in der Demonstratorfabrik getestet werden.

Fazit und Ausblick

Die entwickelte Methodik zeigt, wie eine Durchgängigkeit vom Planungsprozess zur technischen Umsetzung erreicht und die Wandlungsbefähiger in einer angepasst automatisierten Montageanlage berücksichtigt werden können. Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass die definierten Anforderungen durch die Methodik erfüllt werden. Die Potenziale zur Steigerung der Produktivität und Qualität wurden herausgestellt und bei der Validierung durch signifikante Kosten-, Ergonomie-, und Qualitätsverbesserungen innerhalb des neu entwickelten Prozesses bestätigt. Die Ermöglichung der Flexibilität und Wandlungsfähigkeit wurde beschrieben und in einem einheitlichen Datenmodell verankert. Zur praktischen Umsetzung wurden entsprechende Softwaretools und -konzepte geschaffen. Diese konnten innerhalb der Validierung in der Demonstratorfabrik gemeinsam mit den neu entwickelten technischen Lösungen erfolgreich anhand eines Montageprozesses unter realitätsnahen Bedingungen getestet werden.

Ausgehend davon lassen sich Weiterentwicklungen und Potenziale benennen. Diese beziehen sich hauptsächlich auf die Bereiche der Durchführung der Work List Erstellung und Konfiguration sowie des Steuerungskonzeptes. Ebenso gibt es Bedarf nach erweiterter Validierung und der Übertragung auf neue Montageprozesse.

Hinsichtlich des methodischen Vorgehens zur Work List Erstellung bietet sich eine Erweiterung der Funktionalitäten insbesondere für komplexere Prozesse an. Diese können beispielsweise durch eine graphische Benutzeroberfläche zur Work List Erstellung abgedeckt werden. Das Datenmodell und die Moduldatenbank sollte kontinuierlich erweitert und das Einfügen neuer Modulausprägungen noch einfacher und sicherer gestaltet werden. Eine mögliche Maßnahme hierzu ist die Erweiterung der bereits erwähnten Beschreibungssystematik basierend auf Ontologien. Eine standardisierte Datenbank, welche zentral zur Verfügung gestellt wird kann den Anwenderkreis und den Umfang der vorhandenen Modulausprägungen stark erhöhen. Als funktionale Erweiterung kann im CoRe-UI das automatisierte Erstellen von Schaltplänen mit einbezogen werden.

Das Steuerungskonzept kann ebenso weiterentwickelt und flexibler gestaltet werden. Die Programmierung des Systems gestaltet sich auf der genutzten herkömmlichen Steuerung sehr mühsam, sodass eine Weiterentwicklung ohne tiefgreifende Systemkenntnis nicht möglich ist. Haupthindernis ist hier insbesondere die erschwerte Nutzung der objektorientierten Programmierung auf der verwendeten Steuerung und nicht vorhandene Debugging Funktionen. Eine Lösungsmöglichkeit wäre eine Auslagerung des Kerns des Steuerungskonzepts in ein rechenstarkes System als Software. Der Systemablauf kann auf einem externen Rechner stattfinden, welcher mit der Steuerung kommuniziert, die Eingänge abfragt und die Ausgänge entsprechend schaltet. Ist keine standardisierte Steuerung vorgegeben, kann hierzu auch als Komplettlösung eine Soft-SPS genutzt werden.

Im Bereich der Validierung kann das Konzept auf weitere Montageprozesse übertragen und somit an zusätzlichen Anwendungsfällen validiert werden. Zahlreiche weitere Unterbodenmontageprozesse wurden bereits dargestellt, wie bspw. weitere Verkleidungsteile oder das Setzen von Stopfen. Ebenso kann das System des modularen Montageassistenten für Vormontageumfänge (Tür, Frontend o.ä.) genutzt werden oder dem Mitarbeiter an weiteren Stellen in der Hauptmontagelinie unterstützen. Machbarkeitsstudien mit OEM-Partnern sind vereinbart und sollen eine Übertragbarkeit der Methodik und Systemelemente in die Praxis ermöglichen.

9 Literaturverzeichnis

- [ABE16] Abel, M.: Automatisierte Inbetriebnahme von rekonfigurierbaren Bearbeitungsmaschinen mit serviceorientierten Paradigmen. (Reihe: Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Bd. 61), 2016
- [AUD16a] AUDI: Audi Smart Factory. URL: <https://www.audi-mediacyenter.com/de/audi-techday-smart-factory-7076> [Stand: 10.08.2018]
- [AUD16b] AUDI: Die Modulare Montage. Fertigungsinseln statt Fließband. URL: <https://www.audi-mediacyenter.com/de/audi-techday-smart-factory-7076/die-modulare-montage-7078> [Stand: 10.08.2018]
- [AUT14] AutomationML: Whitepaper AutomationML Part2 - Role class libraries, 2014
- [BAC16] Backhaus, Julian Christoph Sebastian: Adaptierbares aufgabenorientiertes Programmiersystem für Montagesysteme. (Reihe: Forschungsberichte IWB, Bd. 319), 2016
- [BAL97] Balzert, H.: Wie erstellt man ein objektorientiertes Analysemodell? In: Informatik-Spektrum. 20, 1997, Nr. 1, S. 38–47
- [BEI14] Beierle, C.; Kern-Isberner, G.: Methoden wissensbasierter Systeme. Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2014
- [BEN16] Bender, M.; Braun, M.; Rally, P.; Scholtz, O.: Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach einfach anfangen. In: Fraunhofer IAO. 2016, 2016
- [BEU05] Beumelburg, K.: Fähigkeitsorientierte Montageablaufplanung in der direkten Mensch-Roboter-Kooperation. (Reihe: IPA-IAO-Forschung und Praxis, Nr. 413). Heimsheim: Jost-Jetter, 2005
- [BLE04] Bley, H.; Reinhart, G.; Seliger, G.; Bernardi, M.; Korne, T.: Appropriate Human Involvement in Assembly and Disassembly. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 53, 2004, Nr. 2, S. 487–509
- [BMB17] BMBF: Industrie 4.0. Innovationen für die Produktion von morgen. URL: https://www.bmbf.de/pub/Industrie_4.0.pdf

- [BMW17] BMW: Die BMW Group setzt auf innovative Automatisierung und flexible Assistenzsysteme in der Produktion. URL: <https://www.press.bmw-group.com/deutschland/article/detail/T0268199DE/die-bmw-group-setzt-auf-innovative-automatisierung-und-flexible-assistenzsysteme-in-der-produktion?language=de> [Stand: 10.08.2018]
- [BMW13] BMWi: Mensch-Technik-Interaktion (Band 3). In: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, 2013
- [BOS16] Bosch Rexroth: Modulare Fertigungslinie für Industrie 4.0. URL: <https://www.boschrexroth.com/de/de/unternehmen/presse/press-detail-1-103680> [Stand: 10.08.2018]
- [BUC15] Buck, R.: Entwurfsmuster für den Aufbau von Baukästen für das Funktionale Engineering. (Reihe: Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Bd. 41). Stuttgart: Fraunhofer-Verl, 2015
- [CHE16] Chemnitz M., Jäger M., Doll U., Vick A.: Gelbe Seiten für Industrie 4.0. Mehrwertdienste für cloud- basierte Steuerungsplattformen. In: SPS Magazin, 2016, 11
- [DAI16] Daimler: „VaMoS“! Mein Weg in die Technologiefabrik. URL: <https://blog.daimler.com/2016/07/11/vamos-mein-weg-zur-technologiefabrik/> [Stand: 10.08.2018]
- [DAN14] Daniel Oberle: How ontologies benefit enterprise applications: Semantic Web – Interoperability, Usability, Applicability vol. 5, 2014
- [DEF01] Defense Acquisition University Press: Systems engineering fundamentals. Virginia, USA: Defense Acquisition University Press, 2001
- [DEU14] Deuse, J.; Roßmann, J.; Kuhlenkötter, B.; Hengstebeck, A.; Stern, O.; Klöckner, M.: A Methodology for the Planning and Implementation of Service Robotics in Industrial Work Processes. In: Procedia CIRP. 23, 2014, S. 41–46
- [DIN 62424] Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik - Fließbilder und Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbilderstellung und CAE-Systemen (IEC 62424:2008) Deutsches Institut für Normung. DIN 62424

- [DIN 91345] Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0) Deutsches Institut für Normung. DIN 91345
- [IEC 61131] Speicherprogrammierbare Steuerungen - Teil 3: Programmiersprachen (IEC 61131-3:2013) Deutsches Institut für Normung IEC 61131-3:2013. IEC 61131
- [DÜR17a] Dürkop L., Jasperneite J.: „Plug & Produce“ als Anwendungsfall von Industrie 4.0. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [DÜR17b] Dürr Paint and Final Assembly: FASplant® - das modulare Endmontagekonzept. URL: http://www.durr-paint.com/fileadmin/user_upload/pfs/02_documents/02_Products/07_Final_Assembly/FASplant_de.pdf [Stand: 10.08.2018]
- [EIG14] Eigner, M.: Überblick Disziplin-spezifische und -übergreifende Vorgehensmodelle. In: Eigner, M.; Roubanov, D.; Zafirov, R. (Hrsg.): Modellbasierte virtuelle Produktentwicklung, 2014
- [EIL15] Eilers, J.: Methodik zur Planung skalierbarer und rekonfigurierbarer Montagesysteme. (Reihe: Fertigungsmesstechnik & Qualitätsmanagement, Band 9/2015). 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl., 2015
- [EPP13] Epple, U.: Agentenmodelle in der Anlagenautomation. In: Göhner, P. (Hrsg.): Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 95–110
- [EVE14] Eversheim W., Schuh G.: Produktion und management. Berlin Heidelberg: Springer, 2014
- [FEL15] Feldmann, S.; Legat, C.; Vogel-Heuser, B.: An Analysis of Challenges and State of the Art for Modular Engineering in the Machine and Plant Manufacturing Domain. In: IFAC-PapersOnLine. 48, 2015, Nr. 10, S. 87–92
- [FIE09] Fiege, R.: Axiomatic Design. Eine Methode zur serviceorientierten Modellierung. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler, 2009
- [FIT51] Fitts, P.: Human engineering for an effective air navigation and traffic control system. In: Washington, DC: National Research Council, 1951

- [FRA16a] Frank, G.: Durchgängiges mechatronisches Engineering für Sondermaschinen. (Reihe: Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Band 48). Stuttgart: Fraunhofer Verlag, 2016
- [FRA13] Frank, T.; Schütz, Daniel, Vogel-Heuser: Funktionaler Anwendungsentwurf für agentenbasierte, verteilte Automatisierungssysteme. In: Göhner, P. (Hrsg.): Agentensysteme in der Automatisierungstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 3–19
- [FRA16b] Fraunhofer IPA: ROB@Work. URL: <https://www.care-o-bot.de/de/rob-work.html> [Stand: 10.08.2018]
- [FRI15] Friedrich, J.; Scheifele, S.; Verl, A.; Lechler, A.: Flexible and Modular Control and Manufacturing System. In: Procedia CIRP. 33, 2015, S. 115–120
- [GOE98] Goepfert, J.: Modulare Produktentwicklung. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1998
- [GOL11] Goll, J.: Methoden und Architekturen der Softwaretechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011
- [GOR16a] Gorecky, D.; Weyer, S.; Hennecke, A.; Zühlke, D.: Design and Instantiation of a Modular System Architecture for Smart Factories. In: IFAC-PapersOnLine. 49, 2016, Nr. 31, S. 79–84
- [GOR16b] Gorecky, D., Weyer, S.: SmartFactoryKL Systemarchitektur für Industrie 4.0-Produktionsanlagen. In: Whitepaper, Technologie-Initiative SmartFactory KL, 2016
- [GRU93] Gruber, T.: A translation approach to portable ontology specifications. In: Knowledge Acquisition. 5, 1993, Nr. 2, S. 199–220
- [GUA95] Guarino, N.; Giaretta P.: Ontologies and knowledge bases: towards a terminological clarification. In: Amsterdam: IOS Press, 1995, S. 25–32
- [HAH] Hahn Automation: Spezifischer Automatisierungsgrad mit MasterCell – modularer Aufbau. URL: <http://www.hahnautomation.com/technologie/montage/> [Stand: 10.08.2018]
- [HEH16] Hehenberger, P.; Vogel-Heuser, B.; Bradley, D.; Eynard, B.; Tomiyama, T.; Achiche, S.: Design, modelling, simulation and integration of cyber

- physical systems: Methods and applications. In: Computers in Industry. 82, 2016, S. 273–289
- [HEI08] Heinrich, G.; Mairon, K.; Grosser, A.: Objektorientierte Systemanalyse: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2008
- [HER08] Herkommer G.: AutomationML – die Grundarchitektur. In: computer-automation.de. 04/08, 2008
- [HER03] Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. (Reihe: Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Technik und Wirtschaft, Bd. 149). Düsseldorf: VDI-Verl., 2003
- [HIG00] Hignett, S.; McAtamney, L.: Rapid Entire Body Assessment (REBA). In: Applied ergonomics. 31, 2000, Nr. 2, S. 201–205
- [HIR14a] Hirzle, A.: AutomationML – ein Überblick. Ein Standard für die Verbesserung des Datenaustauschs von Engineeringwerkzeugen. In: SPS Magazin (Hrsg.): AutomationML – Fachexperten erklären das Format, 2014, S. 3–5
- [HIR14b] Hirzle, A.: AutomationML – Fachexperten erklären das Forma. In: SPS Magazin, 04.02.2014
- [HOO17] Hoogervorst R., Trouwborst C., Kamphuis A., Fumagalli M.: VIKI—More Than a GUI for ROS. In: Koubaa Anis (Hrsg.): ROBOT OPERATING SYSTEM. The complete reference. (Reihe: Studies in computational intelligence, volume 707). [S.l.]: Springer, 2017, S. 633–655
- [HUB16] Huber, W.: Industrie 4.0 in der Automobilproduktion. Ein Praxisbuch. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016
- [JAN09] Janschek, K.: Systementwurf mechatronischer Systeme. Berlin [u.a.]: Springer, 2009
- [JOH17] Johannsmeier, L.; Haddadin, S.: A Hierarchical Human-Robot Interaction-Planning Framework for Task Allocation in Collaborative Industrial Assembly Processes. In: IEEE Robotics and Automation Letters. 2, 2017, Nr. 1, S. 41–48
- [KAR12] Karl, F.; Reinhart, G.; Zäh, M.: Rekonfigurationsfähigkeit von Betriebsmitteln. Kennzahlen zur Bewertung der Rekonfigurationsfähigkeit von Montagebetriebsmitteln. In: wt-online, 2012, Ausgabe 4-, S. S. 228-233

- [KIE07] Kiefer, J.: Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau. (Reihe: Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 43). Saarbrücken: LKT, Univ., 2007
- [KLE15] Klein, P.: Methode zum Engineering von Produktionsanlagen durch Wiederverwendung von Modulen, 2015
- [KLU11] Kluge, S.: Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme. (Reihe: IPA-IAO Forschung und Praxis, Bd. 510). Heimsheim: Jost-Jetter, 2011
- [KLU09] Kluge, S.; Pflüger, T.; Westkämper, E.; Pedell, B.: Modulare Montagesysteme. Potential zur Steigerung der Wirtschaftlichkeit. In: wt Werkstattstechnik online. 99, 2009, Nr. 9, S. 592–597
- [KOL15] Kolberg, D.; Zühlke, D.: Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies. In: IFAC-PapersOnLine. 48, 2015, Nr. 3, S. 1870–1875
- [KON97] Konold, P.; Reger, H.: Angewandte Montagetechnik. Produktgestaltung, Planung, Systeme und Komponenten. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1997
- [KRÜ09] Krüger, J.; Lien, T.; Verl, A.: Cooperation of human and machines in assembly lines. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 58, 2009, Nr. 2, S. 628–646
- [KRÜ17] Krüger, J.; Wang, L.; Verl, A.; Bauernhansl, T.; Carpanzano, E.; Makris, S.; Fleischer, J.; Reinhart, G.; Franke, J.; Pellegrinelli, S.: Innovative control of assembly systems and lines. In: CIRP Annals. 66, 2017, Nr. 2, S. 707–730
- [LAN15] Landherr, M.: Integrierte Produkt- und Montagekonfiguration für die variantenreiche Serienfertigung. (Reihe: Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung, Bd. 39). Stuttgart: Fraunhofer-Verl., 2015
- [LAN02] Langlois, R.: Modularity in technology and organization. In: Journal of Economic Behavior & Organization. 49, 2002, Nr. 1, S. 19–37
- [LAY00] Lay, G.; Schirrmeister, E.: Sackgasse Hochautomatisierung? Praxis des Abbaus von Overengineering in der Produktion. In: Mitteilungen aus der Produktionsinnovationserhebung, 2000, Nr. 22

- [LMM] Leitmerkmalmethode zur Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 2012
- [LIN16] Linthicum, D.: Chapter 1: Service Oriented Architecture (SOA). "SOAs are like snowflakes – no two are alike.". In: Microsoft Developer network, 2016
- [LIP13] Lips, S.: AutomationML: Verhältnismäßig gut! Serie AutomationML Teil 9: Eignet sich AutomationML als neutrale Sprache zur Beschreibung von Verhalten? In: SPS Magazin, 2013, Nr. 9
- [LÜD13] Lüder, A.; Hundt, L.; Schmidt, N.; Schleipen, M.: AutomationML - die Architektur. Serie AutomationML Teil 2: Ein Standard für die Verbesserung des Datenaustauschs von Engineeringwerkzeugen. In: SPS Magazin, 2013, 1+2
- [LÜD17] Lüder A., Schmidt N.: AutomationML in a Nutshell. In: Vogel-Heuser Birgit; Thomas Bauernhansl; Michael ten Hompel (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [LÜD15] Lüdtkke, A.: Wege aus der Ironie in Richtung ernsthafter Automatisierung. In: Botthof, A.; Hartmann, E.; (Hrsg.): Zukunft der Arbeit in Industrie 4.0. Berlin: Springer Vieweg, 2015
- [MAR16] Marseu, E.; Kolberg, D.; Birtel, M.; Zühlke, D.: Interdisciplinary Engineering Methodology for changeable Cyber-Physical Production Systems. In: IFAC-PapersOnLine. 49, 2016, Nr. 31, S. 85–90
- [MAS07] Masak, D.: SOA? Serviceorientierung in Business und Software. Berlin: Springer-Verlag, 2007
- [MER10] Merdan, M.; Zoitl, A.; Koppensteiner, G.; Demmelmayr, F.: Semantische Technologien – Stand der Technik. In: e & i Elektrotechnik und Informationstechnik. 127, 2010, Nr. 10, S. 291–299
- [MIC10] Michalos, G.; Makris, S.; Papakostas, N.; Mourtzis, D.; Chryssolouris, G.: Automotive assembly technologies review: challenges and outlook for a flexible and adaptive approach. In: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. 2, 2010, Nr. 2, S. 81–91
- [MIC16] Michniewicz, J.; Reinhart, G.: Cyber-Physical-Robotics – Modelling of modular robot cells for automated planning and execution of assembly tasks. In: Mechatronics. 34, 2016, S. 170–180

- [MUE11a] Mueller, R.; Eilers, J.; Esser, Martin Florian (Author); Hasse, F.; Janßen, M.; Rochlitz, T.; Siewert, U.; Walther, J.: Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven. Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 2011. 1., Aufl. Herzogenrath: Shaker, 2011
- [MUE16] Mueller, R.; Vette, M.; Mailahn, O.: Process-oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-robot Interaction. In: Procedia CIRP. 44, 2016, S. 210–215
- [MUE14] Mueller, R.: Planungsunterstützung bei komplexen Aufgabenstellungen in der Montage – ein Industrie 4.0 Projekt. In: Tagungsband zum 6. Montage-Tagung 2014. Saarbrücken, 2014,
- [MUE11b] Mueller R.; Esser, M.; Eilers, J.: Rekonfigurationsorientierte Modularisierung von Montagesystemen. In: wt Werkstatttechnik online. 101, 2011, Nr. 9, S. 600–605
- [NYH08] Nyhuis, P.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten. Garbsen: PZH, Produktionstechn. Zentrum, 2008
- [OST04] Osterwalder A.: The Business Model Ontology. A Proposition in a Design Science Approach. Schweiz, 2004
- [PAH05] Pahl, G.; Beitz, W.; Feldhusen, J.; Grote, K.-H.: Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung Methoden und Anwendung. 6. Aufl. Berlin: Springer, 2005
- [PAR07] Park, G.-J.: Analytic methods for design practice. London: Springer, 2007
- [PAR10] Partsch, H.: Requirements-Engineering systematisch. Modellbildung für softwaregestützte Systeme. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010
- [PED16] Pedersen, M.; Nalpantidis, L.; Andersen, R.; Schou, C.; Bøgh, S.; Krüger, V.; Madsen, O.: Robot skills for manufacturing: From concept to industrial deployment. In: Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 37, 2016, S. 282–291
- [PIC16] pICASSO: pICASSO – Industrielle Cloudbasierte Steuerungsplattform für eine Produktion mit cyber-physischen Systemen. URL: <https://www.projekt-picasso.de> [Stand: 10.08.2018]

- [QUI09] Quigley, M.; Conley, K.; Gerkey, B.; Faust, J.; Foote, T.; Leibs, J.; Wheeler, R. : ROS: an open-source Robot Operating System. In: ICRA Workshop on Open Source Software, 2009
- [RAS83] Rasmussen, J.: Skills, rules, and knowledge; signals, signs, and symbols, and other distinctions in human performance models. In: IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. SMC-13, 1983, Nr. 3, S. 257–266
- [REI11] Reinhart, G.; Sieben, C.: Qualitätsoptimierung durch Montageautomatisierung. Analyseverfahren: Entkopplung der Produktqualität manueller Montageprozesse durch selektive Automatisierung. In: wt-online, 2011, Ausgabe 9-2011, S. S. 580-584
- [RET] RetroNet: Retrofitting von Maschinen und Anlagen für die Vernetzung mit Industrie 4.0 Technologie (RetroNet). URL: <http://www.retronet.info/> [Stand: 10.08.2018]
- [RUM11] Rumpe, B.: Modellierung mit UML. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011
- [SAL02] Salvador, F.; Forza, C.; Rungtusanatham, M.: Modularity, product variety, production volume, and component sourcing: theorizing beyond generic prescriptions. In: Journal of Operations Management. 20, 2002, Nr. 5, S. 549–575
- [SAN96] Sanchez, R.; Mahoney, J.: Modularity, flexibility, and knowledge management in product and organization design. In: Strategic Management Journal. 17, 1996, S2, S. 63–76
- [SAU14] Sauer Olaf: Neue Komponenten integrieren sich selbständig. In: IEE - Elektrische Automatisierung und Antriebstechnik. 04/14, 2014, S. 46–48
- [SCH14] Schenk, M.; Müller, E.; Wirth, S.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik. 2., vollst. überarb. und erw. Aufl. Berlin [u.a.]: Springer Vieweg, 2014
- [SCH00] Schilling, M.: Toward a General Modular Systems Theory and Its Application to Interfirm Product Modularity. In: Academy of Management Review. 25, 2000, Nr. 2, S. 312–334

- [SCH13] Schleipen, M.: AutomationML - Integration MES-Wissen. Serie AutomationML Teil 8: Integration domnänenspezifischen MES-Wissens in AutomationML. In: SPS Magazin. VOI. 8, 2013, S. 31–32
- [SCH16a] Schröter, D.; Jaschewski, P.; Kuhrke, B.; Verl, A.: Methodology to Identify Applications for Collaborative Robots in Powertrain Assembly. In: Procedia CIRP. 55, 2016, S. 12–17
- [SCH16b] Schröter, D.; Kuhlmann, P.; Finsterbusch, T.; Kuhrke, B.; Verl, A.: Introducing Process Building Blocks for Designing Human Robot Interaction Work Systems and Calculating Accurate Cycle Times. In: Procedia CIRP. 44, 2016, S. 216–221
- [SCH11] Schuh, G.: Handbuch Produktion und Management. 2. vollst. neu bearb. u. erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2011-
- [SHE15] Shen, Y.: System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage. (Reihe: Forschungsberichte IWB, Bd. 305), 2015
- [SIE17] Siepermann M.: Objektorientierung. In: Gabler Wirtschaftslexikon, 2017
- [SIM09] Sim, T.; Li, F.; Vogel-Heuser, B.: Benefits of an Interdisciplinary Modular Concept in Automation of Machine and Plant Manufacturing. In: IFAC Proceedings Volumes. 42, 2009, Nr. 4, S. 894–899
- [STA06] Stanton, N.: Hierarchical task analysis: developments, applications, and extensions. In: Applied ergonomics. 37, 2006, Nr. 1, S. 55–79
- [STE14] Steegmüller D., Zürn M.: Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft. In: Vogel-Heuser, B.; ten Hompel M.; Bauernhansel T. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2014
- [SUD08] Sudhoff, W.: Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion. (Reihe: Forschungsberichte IWB, Bd. 208). München: H. Utz, 2008
- [SUH90] Suh, N.: The principles of design. (Reihe: Oxford series on advanced manufacturing, Bd. 6). New York: Oxford University Press, 1990

- [SUH01] Suh, N.: Axiomatic design. Advances and applications. New York: Oxford University Press, 2001
- [TAK11] Takata, S.; Hirano, T.: Human and robot allocation method for hybrid assembly systems. In: CIRP Annals - Manufacturing Technology. 60, 2011, Nr. 1, S. 9–12
- [TAN10] Tan Jeffrey Too Chuan; Duan, F.; Kato, R.; Arai, T.: Collaboration Planning by Task Analysis in Human-Robot Collaborative Manufacturing System. In: Advances in Robot Manipulators, 2010
- [TEA] Teamtechnik: standardisierten Maschinenplattformen. URL: <http://www.teamtechnik.com/automotive/maschinenplattformen/> [Stand: 10.08.2018]
- [THI05] Thiemermann, S.: Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter. (Reihe: IPA-IAO-Forschung und Praxis, Nr. 411). Heimsheim: Jost-Jetter, 2005
- [ULR95] Ulrich, K.: The role of product architecture in the manufacturing firm. In: Research Policy. 24, 1995, Nr. 3, S. 419–440
- [VDI 2206] Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme Verein Deutscher Ingenieure Richtlinie. VDI 2206
- [VDI 2221] Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte Verein Deutscher Ingenieure Richtlinie. VDI 2221
- [VDI 2803] Funktionenanalyse - Grundlagen und Methode Verein Deutscher Ingenieure Richtlinie. VDI 2803
- [VOG09] Vogel-Heuser, B.: Automation & embedded systems. Effizienzsteigerung im Engineering. (Reihe: Embedded Systems I Tagungen und Berichte, Bd. 1). Kassel: Kassel University Press, 2009
- [VOG15a] Vogel-Heuser, B.; Fay, A.; Schaefer, I.; Tichy, M.: Evolution of software in automated production systems: Challenges and research directions. In: Journal of Systems and Software. 110, 2015, S. 54–84
- [VOG15b] Vogel-Heuser, B.; Göhner, P.; Lüder, A.: Agent-Based Control of Production Systems—and Its Architectural Challenges: Industrial Agents: Elsevier, 2015, S. 153–170

- [VOL16] Volkswagen AG: Volkswagen Werk Wolfsburg. Produktion Volkswagen Touran, Montage. URL: https://www.volkswagen-media-services.com/detailpage/-/detail/Volkswagen-Werk-Wolfsburg/view/3083045/166c1330e40ef38737a77449a8d3427c?p_p_auth=D8pWND5w [Stand: 10.08.2018]
- [WEB15] Weber, J.; Förster, D.; Kößler, J.; Paetzold, K.: Design of Changeable Production Units within the Automotive Sector with Axiomatic Design. In: *Procedia CIRP*. 34, 2015, S. 93–97
- [WEB16] Weber, J.; Stäbler, M.; Baumgartl, J.; Paetzold, K.: Mobile Assembly Units as Enabler for Changeable Assembly Lines. In: *Procedia CIRP*. 44, 2016, S. 383–388
- [WEI17] Weidemann, U.: Montagecluster zur Strukturierung der Fahrzeugendmontage. Eine Methode zur frühzeitigen Planung und Auslegung von Endmontagelinien, 2017
- [WER09] Werner, J.: Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie. 1. Aufl. [S.I.]: Herbert Utz Verlag, 2009
- [WIE05] Wiendahl, H.-P.: Planung modularer Fabriken. Vorgehen und Beispiele aus der Praxis. München, Wien: Hanser, 2005
- [WOO12] Wooldridge, M.: An introduction to multiagent systems. 2. ed., repr. Chichester: Wiley, 2012

Anhang

I. Klassendiagramme und Befehlsaufrufe

Workcell	TaskControler
objectInfo usedEndeffectors usedHMI systemFunctions taskControler	status statusList possibleExecuter executer hasToRun workListID jobData
initialize() taskPossible() addTask() doJob() allJobsDone() isCapable() getExecuter() clearJobs() getEndeffectorByID()	init() reset() addExecuter() addJob() main() allJobsDone() isCapable() getExecuter() clearJobs() getStatus()

Klasse Workcell und Task Controller

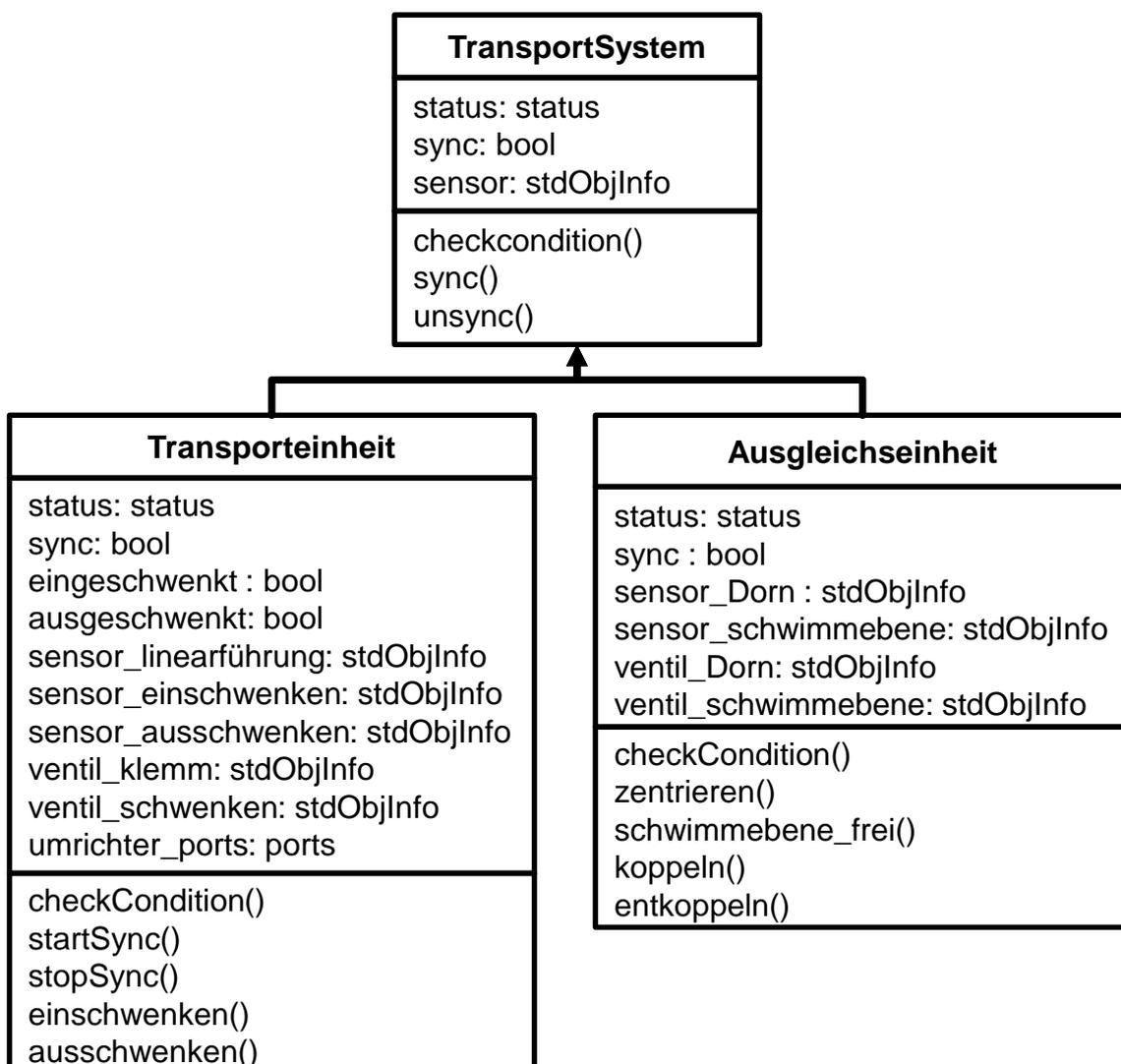
WorkListHandler
status: status updated_eth: bool ethInterface: eth_interface storedListsNumber: int storedLists: stdObjInfo usedLists: int storedListsName: Array of string storedListsLength: Array of int possibleTasks: stdObjInfo jobStructure: strcture jobStructureNumber: int possibleTasksNumber: int stacks: int selectedList: int methodLast: int sync: bool
addElement() selectName() addJob() insertJob() finished() loadList() startJob() getNextJob() addJobdata() numPossibleJobs() givePossibleJob() numberOfWorkLists() nameOfWorkList() numberOfJobsInList() jobInJobList() liveMode() addJobData() givePJobData() restart()

Endeffektor
status: status taskController: taskController connectedParts: stdObjInfo usedRobot: stdObjInfo transportSystems: stdObjInfo TCP: dataPosition mustBeSynced: bool usedAllData: allData usedJobInputData: jobInputData paused: bool TCPMass: real connectedPartyQuantity: int
main() addElement() calcMass() pause() unpause() addJob() allJobsDone() isCapable() getExecuter()

Klasse Work List Handler und Endeffektor

Befehl	Funktion
numPossibleJobs	Gibt die Anzahl aller ausführbaren Dienste der Steuerung
givePossibleJob	Gibt eine Liste aller ausführbaren Dienste der Steuerung
givePJobData	Gibt die Attribute eines ausführbaren Dienstes
giveJobDescription	Gibt die Beschreibung eines ausführbaren Dienstes
numberOfWorkLists	Gibt die Anzahl aller vorhandenen WorkLists
nameOfWorkList	Gibt den Bezeichner einer WorkList
numberOfJobsInList	Gibt die Anzahl der Dienste in einer WorkList
jobInWorkList	Wählt einen Dienst einer WorkList
liveMode	Aktiviert den Live-Mode
addJobData	Fügt einem Dienst Eigenschaften hinzu

Befehle zur Kommunikation des CoRe-UI mit der Steuerung



Klasse **TransportSystem** mit Vererbung zu **Transporteinheit** und **Ausgleichseinheit**

II. Wirtschaftlichkeitsberechnung

Zur beispielhaften Bewertung der Wirtschaftlichkeit wurde folgende Investitionsrechnung durchgeführt. Die verwendeten Zahlen basieren auf branchenüblichen Werten und Erfahrungen. Je nach Hersteller, Produktionssituation und speziellen Anforderungen können sich Änderungen ergeben.

Gesamtsumme Investition (I)	550.000 €
Aufwand Prozessumstellung (Planung, Schulung etc.)	100.000€
Engineeringaufwand	200.000€
Summe Systemkomponenten:	250.000€
<i>Es werden zwei Systeme benötigt:</i>	
<i>Roboter</i>	<i>2 × 30.000€</i>
<i>Werkzeug</i>	<i>2 × 30.000€</i>
<i>Sensoren</i>	<i>2 × 10.000 €</i>
<i>Transporteinheit mit Schiene und Antrieb</i>	<i>2 × 25.000 €</i>
<i>Elektroninstallation</i>	<i>2 × 15.000€</i>
<i>Sonstiges</i>	<i>2 × 15.000€</i>
Betriebskosten pro Jahr (ca. 5% des Invests)	27.500€
Einsparungen pro Jahr (Berechnung siehe unten)	320.000€
Zinsfaktor (i)	8 %
Projektlaufzeit (typischer Produktlebenszyklus)	6 Jahre

Berechnung der jährlichen Einsparungen

Mitarbeitereinsatz (MA)	2 Mitarbeiter
Schichten pro Tag	2 × 8h
Lohnkosten Mitarbeiter	80.000 €/a

$$\frac{\text{Einsparungen}}{\text{Jahr}} (Z_t) = 2MA * 2 \text{ Schichten} * 80.000 \frac{\text{€}}{\text{a}} = \mathbf{320.000} \frac{\text{€}}{\text{a}}$$

Statische Investitionsrechnung

$$\begin{aligned} \text{Jährlicher Überschuss} &= \text{Einsparungen} - \text{Betriebskosten} \\ &= 320.000 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} - 27.500 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} = \mathbf{292.500} \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Amortisationszeit} &= \frac{\text{Investitionskosten}}{\text{Einsparungen} - \text{Betriebskosten (Pro Jahr)}} \\ &= \frac{550.000\text{€}}{320.000 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} - 27.500 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}}} = \mathbf{1,9 \text{ Jahre}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kosten Nutzen Rechnung} &= \text{Jährlicher Überschuss} - \text{Investitionskosten} \\ &= \left(292.500 \frac{\text{€}}{\text{Jahr}} \right) * 6 \text{ Jahre} - 550.000\text{€} = \mathbf{1.205.000\text{€}} \end{aligned}$$

Net Present Value (Kapitalwert)

$$C = -I + Z_t * \frac{(1+i)^T - 1}{(1+i)^{T+i}} = -500.000\text{€} + 292.500\text{€} * \frac{(1+0,08)^6 - 1}{(1+0,08)^{6*0,08}} = \mathbf{852.192 \text{ €}}$$

C= Kapitalwert, I= Investitionssumme i =Zinsfaktor, Zt=Jährlicher Überschuss

T=Betrachtungsdauer

IV. Ergonomiebewertungen nach REBA und Leitmerkmalmethode

Bewertung nach ReBA

A. Neck, Trunk and Leg Analysis

REBA Assessment Worksheet

Trunk: 3, Load/Force: 0, Neck: 3, Legs: 1, Table A: 5, Table B: 8, Coupling: 1, Upper Arm: 6, Table C: 9, Lower Arm: 2, Activity: 2, Wrist: 1, REBA Score: 11

Adjustments:
 If trunk is twisted: -1
 If trunk is side bending: -1
 If neck is twisted: -1
 If neck is side bending: +1
 Adjust: 30-60° +60, Add +1, Add -2
 Adjust...
 If shoulder is raised: +1
 If upper arm is abducted: -1
 If arm is supported or person is leaning: -1

REBA Score	Risk Level	Action
1	Negligible	None necessary
2 - 3	Low	May be necessary
4 - 7	Medium	Necessary
8 - 10	High	Necessary soon
11 - 15	Very High	Necessary now

Subject: Unterboden
 Task: Unterbodenverschraubung
 Scorer: Xxxxxx Xxxxxx
 Date: dd/mm/yy

Bewertung nach REBA

Bewertung nach Leitmerkmalmethode vor Optimierung

Leitmerkmalmethode zur Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen

Gibt es pro Arbeitstag mehrere unterschiedliche Arbeitsaufgaben, sind diese getrennt zu erfassen.

Arbeitsaufgabe Unterbodenverschraubung

Version 2012

Unterbodenverschraubung

1. Schritt: Bestimmung der Zeitwichtung

3	Gesamtdauer dieser Tätigkeit pro Schicht [bis ... Stunden]	1	2	3	4	5 ✓	6	7	8	9	10
	Zeitwichtung	1	1,5	2	2,5	3 ✓	3,5	4	4,5	5	5,5

2. Schritt: Bestimmung der Wichtungen von Art der Kraftausübung, Greifbedingungen, Arbeitsorganisation, Ausführungsbedingungen, Körperhaltung und Hand-/Armstellung und -bewegung

7.5

Art der Kraftausübung(en) im Finger-Handbereich		Halten				Bewegen					
		mittl. Haltedauer [Sek. pro Minute]				mittl. Bewegungshäufigkeiten [Anzahl pro Minute]					
		60-31	30-16	15-4	<4	<1	1-4	5-15	16-30	31-60	>60
		Wichtung									
Höhe	Beschreibung, typische Beispiele	2	1	0,5	0	0	0,5	1	2	3	
gering 	Sehr geringe Kräfte z.B. Tastenbedienung / Verschieben / Ordnen	3	1,5	✓1 ✓	0	✓0 ✓	1	1,5	3	5	
	Geringe Kräfte z.B. Materialführung / Einlegen	5	2	✓1 ✓	0	✓0,5 ✓	1	2	5	8	
	Mittlere Kräfte z.B. Greifen / Fügen von kleinen Werkstücken mit der Hand oder kleinen Werkzeugen	8	4	2	0,5	1 ✓	2	4	8	13	
	Hohe Kräfte z.B. Drehen / Wickeln / Verpacken / Fassen / Halten oder Fügen von Teilen / Eindrücken / Schneiden / Arbeiten mit kleineren angetriebenen Handwerkzeugen	12	6	3	1	1	3	6	12	21	
	Sehr hohe Kräfte z.B. Kraftbetontes Schneiden / Arbeit mit kleinen Tackern / Bewegen oder Halten von Teilen oder Werkzeugen	19	9	4 ✓	1	2	4	9	19	33	
hoch	Spitzenkräfte z.B. Schrauben anziehen, lösen / Trennen / Eindrücken	-	-	-	1	1	3	6	12	21	
Der Arbeitszyklus ist zu beobachten und die Wichtungen für die Kraftkategorien zu markieren. Addiert (linke und rechte Hand getrennt) ergeben diese die Kraftwichtung. Für die Errechnung der Gesamtpunktzahl ist der höhere Wert zu verwenden.		Wichtungen der Kraftausübung:					Linke Hand: 2.5		Rechte Hand: 7.5		

2	Kraftübertragung / Greifbedingungen	Wichtung
	Optimale Kraftübertragung/-einleitung / Arbeitsgegenstände gut greifbar (z.B. Stabform, Griffmulden) / gute ergonomische Griffgestaltung (Griffe, Tasten, Werkzeuge)	0
	Eingeschränkte Kraftübertragung/-einleitung / erhöhte Haltekräfte erforderlich / keine gestalteten Griffe	2 ✓
	Kraftübertragung/-einleitung erheblich behindert / Arbeitsgegenstände kaum greifbar (schmierig, weich, scharfkantig) / keine oder ungeeignete Griffe	4

3	Hand-/Armstellung und -bewegung ¹⁾		Wichtung
		Gut: Stellung oder Bewegungen der Gelenke im mittleren (entspannten) Bereich / nur selten Abweichungen	0
		Eingeschränkt: gelegentliche Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche	1
		Ungünstig: Häufige Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche	2
		Schlecht: Ständige Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche / lang dauerndes statisches Halten der Arme ohne Hand-Arm-Abstützung	3 ✓
¹⁾ Es sind die typischen Stellungen zu berücksichtigen. Seltene Abweichungen können vernachlässigt werden.			

1	Arbeitsorganisation		Wichtung
	Häufig Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten / mehrere Arbeitsgänge / ausreichende Erholungsmöglichkeit		0
	Selten Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten / wenige Arbeitsgänge / Erholzeiten ausreichend		1 ✓
	Kein/kaum Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten / wenige Einzelbewegungen pro Vorgang / hohes Arbeitstempo durch hohe Austaktung und/oder hohe Akkordarbeitsleistung / ungleichmäßiger Arbeitsablauf mit zeitweise hohen Belastungsspitzen / zu wenig oder zu kurze Erholzeiten		2
<i>In der Tabelle nicht genannte Merkmale sind sinngemäß zu berücksichtigen.</i>			

Ausführungsbedingungen		Wichtung	0
Gut: sichere Detailerkennbarkeit/ keine Blendung / gute klimatische Bedingungen		0	✓
Eingeschränkt: erschwerte Detailerkennbarkeit durch Blendung oder zu kleine Details / Zugluft / Kälte / Nässe / Konzentrationsstörungen durch Geräusche		1	
<i>In der Tabelle nicht genannte Merkmale sind sinngemäß zu berücksichtigen. Bei sehr ungünstigen Bedingungen kann die Wichtung 2 vergeben werden.</i>			
Körperhaltung ^{**)}		Wichtung	5
	Gut: Wechsel von Sitzen und Stehen möglich / Wechsel von Stehen und Gehen / dynamisches Sitzen ist möglich / Hand-Arm-Auflage bei Bedarf möglich / keine Verdrehung / Kopfhaltung variabel / kein Greifen über Schulterhöhe	0	
	Eingeschränkt: Rumpf mit leichter Neigung des Körpers zum Handlungsbereich / überwiegend Sitzen mit gelegentlichem Stehen oder Gehen / gelegentliches Greifen über Schulterhöhe	1	
	Ungünstig: Rumpf deutlich vorgeneigt und/oder verdreht / Kopfhaltung zur Detailerkennung vorgegeben / eingeschränkte Bewegungsfreiheit / ausschließlich Stehen ohne Gehen / häufiges Greifen über Schulterhöhe / häufiges körperfernes Greifen	3	
	Schlecht: Rumpf stärker verdreht und vorgeneigt / streng fixierte Körperhaltung / visuelle Kontrolle der Handlung über Lupen oder Mikroskope / starke Kopfneigung oder -verdrehung / häufiges Bücken / ständiges Greifen über Schulterhöhe / ständiges körperfernes Greifen		✓
^{**) Es sind die typischen Körperhaltungen zu berücksichtigen. Seltene Abweichungen können vernachlässigt werden.}			

3. Schritt: Bewertung

Die für diese Tätigkeit zutreffenden Wichtungen sind in das Schema einzutragen und auszurechnen

	Art der Kraftausübung(en) im Finger-Hand-Bereich	7.5	(eigene Bemerkungen)
+	Kraftübertragung/Greifbedingungen	2	
+	Hand-/Armstellung und -bewegung	3	
+	Arbeitsorganisation	1	
+	Ausführungsbedingungen	0	
+	Körperhaltung	5	
=	Summe	18.5	

18.5 x **3** (Zeitwichtung) = **55**

Anhand des errechneten Punktwertes und der folgenden Tabelle kann eine grobe Bewertung vorgenommen werden.

Risikobereich ^{***)}	Punktwert	Beschreibung
1 	<10	Geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich.
2 	10 bis <25	Mittlere Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll.
3 	25 bis <50	Erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Gestaltungsmaßnahmen sind zu prüfen.
4 	≥50	Hohe Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmaßnahmen sind erforderlich.

^{***)} Die Grenzen zwischen den Risikobereichen sind aufgrund der individuellen Arbeitstechniken und Leistungsvoraussetzungen fließend. Damit darf die Einstufung nur als **Orientierungshilfe** verstanden werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit steigenden Punktwerten die Belastung des Muskel-Skelett-Systems zunimmt.

(Datum & Unterschrift des Beurteilers)

Bewertung nach Leitmerkmalmethode nach Optimierung

Leitmerkmalmethode zur Erfassung von Belastungen bei manuellen Arbeitsprozessen

Gibt es pro Arbeitstag mehrere unterschiedliche Arbeitsaufgaben, sind diese getrennt zu erfassen.

Arbeitsaufgabe Unterbodenverschraubung

Version 2012

Unterbodenverschraubung

1. Schritt: Bestimmung der Zeitwichtung

2	Gesamtdauer dieser Tätigkeit pro Schicht [bis ... Stunden]	1	2	3 ✓	4	5	6	7	8	9	10
	Zeitwichtung	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5

2. Schritt: Bestimmung der Wichtungen von Art der Kraftausübung, Greifbedingungen, Arbeitsorganisation, Ausführungsbedingungen, Körperhaltung und Hand-/Armstellung und -bewegung

4.5

Art der Kraftausübung(en) im Finger-Handbereich		Halten				Bewegen					
		mittl. Haltedauer [Sek. pro Minute]				mittl. Bewegungshäufigkeiten [Anzahl pro Minute]					
		60-31	30-16	15-4	<4	<1	1-4	5-15	16-30	31-60	>60
	Sehr geringe Kräfte z.B. Tastenbedienung / Verschieben / Ordnen	2	1	0,5	0	0	0,5	1	2	3	
	Geringe Kräfte z.B. Materialführung / Einlegen	3	1,5	✓1 ✓	0	✓0 ✓	1	1,5	3	5	
	Mittlere Kräfte z.B. Greifen / Fügen von kleinen Werkstücken mit der Hand oder kleinen Werkzeugen	5	2	✓1 ✓	0	✓0,5 ✓	1	2	5	8	
	Hohe Kräfte z.B. Drehen / Wickeln / Verpacken / Fassen / Halten oder Fügen von Teilen / Eindrücken / Schneiden / Arbeiten mit kleineren angetriebenen Handwerkzeugen	8	4	2	0,5	1 ✓	2	4	8	13	
	Sehr hohe Kräfte z.B. Kraftbetontes Schneiden / Arbeit mit kleinen Tackern / Bewegen oder Halten von Teilen oder Werkzeugen	12	6	3	1	1	3	6	12	21	
	Spitzenkräfte z.B. Schrauben anziehen, lösen / Trennen / Eindrücken	19	9	4	1 ✓	2	4	9	19	33	
	Schlagen mit Daumenballen, Handfläche oder Faust	-	-	-	1	1	3	6	12	21	
<p><i>Der Arbeitszyklus ist zu beobachten und die Wichtungen für die Kraftkategorien zu markieren. Addiert (linke und rechte Hand getrennt) ergeben diese die Kraftwichtung. Für die Errechnung der Gesamtpunktzahl ist der höhere Wert zu verwenden.</i></p>		Wichtungen der Kraftausübung:					Linke Hand: 2.5	Rechte Hand: 4.5			

0	Kraftübertragung / Greifbedingungen	Wichtung
	Optimale Kraftübertragung/-einleitung / Arbeitsgegenstände gut greifbar (z.B. Stabform, Griffmulden) / gute ergonomische Griffgestaltung (Griffe, Tasten, Werkzeuge)	✓
	Eingeschränkte Kraftübertragung/-einleitung / erhöhte Haltekräfte erforderlich / keine gestalteten Griffe	2
	Kraftübertragung/-einleitung erheblich behindert / Arbeitsgegenstände kaum greifbar (schmierig, weich, scharfkantig) / keine oder ungeeignete Griffe	4

3	Hand-/Armstellung und -bewegung ¹⁾	Wichtung
	Gut: Stellung oder Bewegungen der Gelenke im mittleren (entspannten) Bereich / nur selten Abweichungen	0
	Eingeschränkt: gelegentliche Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche	1
	Ungünstig: Häufige Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche	2
	Schlecht: Ständige Stellungen oder Bewegungen der Gelenke am Ende der Beweglichkeitsbereiche / lang dauerndes statisches Halten der Arme ohne Hand-Arm-Abstützung	3 ✓
¹⁾ Es sind die typischen Stellungen zu berücksichtigen. Seltene Abweichungen können vernachlässigt werden.		

1	Arbeitsorganisation	Wichtung
	Häufig Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten / mehrere Arbeitsgänge / ausreichende Erholungsmöglichkeit	0
	Selten Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten / wenige Arbeitsgänge / Erholzeiten ausreichend	1 ✓
	Kein/kaum Belastungswechsel durch andere Tätigkeiten / wenige Einzelbewegungen pro Vorgang / hohes Arbeitstempo durch hohe Austaktung und/oder hohe Akkordarbeitsleistung / ungleichmäßiger Arbeitsablauf mit zeitweise hohen Belastungsspitzen / zu wenig oder zu kurze Erholzeiten	2
<i>In der Tabelle nicht genannte Merkmale sind sinngemäß zu berücksichtigen.</i>		

Ausführungsbedingungen		Wichtung	0
Gut: sichere Detailerkennbarkeit/ keine Blendung / gute klimatische Bedingungen		0	✓
Eingeschränkt: erschwerte Detailerkennbarkeit durch Blendung oder zu kleine Details / Zugluft / Kälte / Nässe / Konzentrationsstörungen durch Geräusche		1	
<i>In der Tabelle nicht genannte Merkmale sind sinngemäß zu berücksichtigen. Bei sehr ungünstigen Bedingungen kann die Wichtung 2 vergeben werden.</i>			
Körperhaltung ^{**)}		Wichtung	3
	Gut: Wechsel von Sitzen und Stehen möglich / Wechsel von Stehen und Gehen / dynamisches Sitzen ist möglich / Hand-Arm-Auflage bei Bedarf möglich / keine Verdrehung / Kopfhaltung variabel / kein Greifen über Schulterhöhe	0	
	Eingeschränkt: Rumpf mit leichter Neigung des Körpers zum Handlungsbereich / überwiegend Sitzen mit gelegentlichem Stehen oder Gehen / gelegentliches Greifen über Schulterhöhe	1	
	Ungünstig: Rumpf deutlich vorgeneigt und/oder verdreht / Kopfhaltung zur Detailerkennung vorgegeben / eingeschränkte Bewegungsfreiheit / ausschließlich Stehen ohne Gehen / häufiges Greifen über Schulterhöhe / häufiges körperfernes Greifen		✓
	Schlecht: Rumpf stärker verdreht und vorgeneigt / streng fixierte Körperhaltung / visuelle Kontrolle der Handlung über Lupen oder Mikroskope / starke Kopfneigung oder -verdrehung / häufiges Bücken / ständiges Greifen über Schulterhöhe / ständiges körperfernes Greifen	5	
^{*)} Es sind die typischen Körperhaltungen zu berücksichtigen. Seltene Abweichungen können vernachlässigt werden.			

3. Schritt: Bewertung

Die für diese Tätigkeit zutreffenden Wichtungen sind in das Schema einzutragen und auszurechnen

	Art der Kraftausübung(en) im Finger-Hand-Bereich	4.5	(eigene Bemerkungen)
+	Kraftübertragung/Greifbedingungen	0	
+	Hand-/Armstellung und -bewegung	3	
+	Arbeitsorganisation	1	
+	Ausführungsbedingungen	0	
+	Körperhaltung	3	
=	Summe	11.5	\times 2 Zeitwichtung = 23

Anhand des errechneten Punktwertes und der folgenden Tabelle kann eine grobe Bewertung vorgenommen werden.

Risikobereich ^{***)}	Punktwert	Beschreibung
1 	<10	Geringe Belastung, Gesundheitsgefährdung durch körperliche Überbeanspruchung ist unwahrscheinlich.
2 	10 bis <25	Mittlere Belastung, eine körperliche Überbeanspruchung ist bei vermindert belastbaren Personen möglich. Für diesen Personenkreis sind Gestaltungsmaßnahmen sinnvoll.
3 	25 bis <50	Erhöhte Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist auch für normal belastbare Personen möglich. Gestaltungsmaßnahmen sind zu prüfen.
4 	≥50	Hohe Belastung, körperliche Überbeanspruchung ist wahrscheinlich. Gestaltungsmaßnahmen sind erforderlich.

^{***)} Die Grenzen zwischen den Risikobereichen sind aufgrund der individuellen Arbeitstechniken und Leistungsvoraussetzungen fließend. Damit darf die Einstufung nur als **Orientierungshilfe** verstanden werden. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass mit steigenden Punktwerten die Belastung des Muskel-Skelett-Systems zunimmt.

(Datum & Unterschrift des Beurteilers)

V. Zugehörige studentische Arbeiten

In Zusammenhang mit den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur durchgängigen modularen Engineeringmethodik und der Umsetzung des Validierungsszenarios innerhalb des Forschungsschwerpunkts Montageverfahren und -automatisierung, am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik entstanden studentische Arbeiten, deren Ergebnisse partiell in die vorliegende Dissertation eingeflossen sind. Die Arbeiten entstanden unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors und werden im Folgenden aufgelistet. Der Dank des Autors gilt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung der vorliegenden Arbeit

- **Attique Bashir:** *„Entwicklung und Bewertung einer Prüf- und Inbetriebnahmestation im Bereich der Fahrzeugendmontage mit Schwerpunkt Mensch-Roboter Kooperation“*, Bachelorarbeit, 2013.
- **Pascal Toussaint :** *„Integration eines Leichtbauroboters in die Montagelinie eines Automobilherstellers“*, Bachelorarbeit, 2014.
- **Lennard Margies:** *„Planung und Integration eines Steuerungskonzeptes der automatisierten Endmontage in Mensch-Roboter-Kollaboration“*, Bachelorarbeit, 2015.
- **Matthias Kunz:** *„Prozessanalyse, Aufgabenplanung und Automatisierungskonzept am Beispiel der Unterbodenmontage in Mensch-Roboter-Kollaboration“*, Bachelorarbeit, 2016.
- **Pascal Toussaint:** *„Automatisierte Schraubprozesse Analyse, Einflussgrößen, Auslegung am Beispiel der Unterbodenmontage in der Automobilindustrie“*, F&E Arbeit, 2016.
- **Martin Karkowski:** *„Entwicklung eines modularen Steuerungs- und Integrationskonzept zur Implementierung der Mensch-Roboter-Interaktion in die Automobilmontage“*, Masterarbeit, 2016.
- **Lennard Margies:** *„Wandlungsfähige Aufgabenbeschreibung und Systemkonfiguration einer automatisierten mechatronischen Montageanlage“*, Masterarbeit, 2018.