

**Methodik für Wissens- und Prozessmanagement
bei der interaktiven kollaborativen Montage
variantenreicher Produkte**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
von der KIT-Fakultät für Maschinenbau des
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

angenommene

Dissertation

von

Dipl.-Geogr. Marcus Schneider, MSc(GIS), M.C.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 24.06.2020

Referent: Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova

Korreferent: Prof. Dr. Andreas Lux

Kurzfassung

Kundenindividuelle Produkte werden in vielen Märkten immer stärker nachgefragt und stellen Unternehmen vor die Herausforderung, diese in möglichst vielen Varianten und dennoch effizient herstellen zu können. Ein möglicher Ansatz dazu ist die kollaborative Montage, die die besonderen Fähigkeiten von Mensch und Roboter kombiniert. Neben Fragen der Sicherheit und der physischen Gestaltung des Arbeitsplatzes kommt dem Informationsmanagement eine besondere Rolle zu, denn im Vergleich zur rein manuellen oder vollautomatisierten Montage gibt es mehr Beteiligte, mehr Schnittstellen und daher auch mehr kritische Informationsflüsse.

Ein kollaborationsgerechtes Wissens- und Prozessmanagement muss die Integration aller beteiligten Systeme unterstützen, spezifische Fragen der Arbeitsteilung im Rahmen der Steuerung adressieren, aber auch die Planung und das Engineering neuer Varianten ermöglichen und durch Persistierung und Analyse von Prozessdaten zu einer stetigen Qualitätssteigerung beitragen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung und Validierung einer entsprechenden Methodik. Dazu wird das Konzept eines „Manufacturing Integration Bus“ eingeführt und mit speziellen Verfahren zur kollaborativen Arbeitssteuerung und einem durchgehenden Ansatz zur Verwertung der Prozessdaten kombiniert.

An einem Minimal-Demonstrator, einem Demonstrator mit erweiterten Fähigkeiten und einer industriellen Anlage wird die Methodik validiert.

Abstract

Customer-specific products are increasingly in demand in many markets and present companies with the challenge of being able to manufacture them in as many variants as possible and still efficiently. One possible approach is collaborative assembly, which combines the special capabilities of humans and robots. In addition to questions of safety and the physical design of the workplace, information management plays a crucial role, because compared to purely manual or fully automated assembly, there are more participants, more interfaces and therefore more critical information flows.

Collaboration-oriented knowledge and process management must support the integration of all systems involved, address specific questions of the division of labor within the control system, but also enable the planning and engineering of new variants and contribute to a continuous increase in quality through the persistence and analysis of process data.

The aim of this thesis is the development and validation of a corresponding methodology. The concept of a „Manufacturing Integration Bus“ is introduced and combined with special procedures for collaborative work control and a continuous approach for the utilization of the process data.

The methodology will be validated using a minimum demonstrator, a demonstrator with extended capabilities and an industrial machine.

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Mitarbeiter der Seeburger AG und des BMBF-Forschungsprojekts „KoKoMo“, gefördert durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Programms „Innovationen für die Produktion, Dienstleistung und Arbeit von morgen“, betreut vom Projektträger Karlsruhe (PTKA-PFT).

Mein besonderer herzlicher Dank gilt Frau Prof. Dr. Dr.-Ing. Dr. h. c. Jivka Ovtcharova (Institut für Informationsmanagement im Ingenieurwesen des Karlsruher Instituts für Technologie KIT) für die Annahme als externer Doktorand und die wirklich hervorragende Betreuung. In regelmäßigen Gesprächen hat sie sehr zielorientiert immer wieder meinen Fokus auf die wesentlichen nächsten Schritte gelenkt und fachlich für den roten Faden gesorgt.

Herrn Prof. Dr. Andreas Lux (Hochschule Trier) danke ich für seine Bereitschaft zur Übernahme des Zweitgutachtens und seine Unterstützung im vorangegangenen Studium.

Ohne die Weitsicht, die Förderung und das Vertrauen von Dr. Martin Kuntz (Seeburger AG) hätte ich nicht die Möglichkeit zur Arbeit an diesem Projekt gehabt und daher danke ich ihm besonders dafür. Ebenfalls sehr wohlwollend unterstützt hat mich Dr.-Ing. Seref Erkayhan (Seeburger AG), dem ich auch für die Herstellung der entscheidenden Kontakte sehr dankbar bin, sowie auch Matthias Feßenbecker (Seeburger AG). Das Ergebnis zahlreicher Diskussionen mit Viktor Schubert (Seeburger AG) ist ebenso eingeflossen

wie auch indirekt die organisatorische Unterstützung durch Karin Schmid (KIT), wofür ich mich ebenfalls herzlich bedanke.

Auch bei den Projektpartnern des KoKoMo-Projekts, insbesondere bei Simon Roggendorf (RWTH Aachen) und Patrick Rückert (Universität Bremen) bedanke ich mich für zahlreiche anregende Diskussionen und die sehr gute Zusammenarbeit im Projekt. Beides hat mir auch inhaltlich bei dieser Arbeit weitergeholfen. Ebenso danke ich Dr. Harald Grübel und Peter Dieterich (Euchner AG) für die konstruktive Zusammenarbeit und die Möglichkeit der Erprobung an einem realen Fallbeispiel aus der Industrie.

Zusätzlich möchte ich noch einige Familienmitglieder erwähnen, denen ich natürlich noch so viel mehr zu verdanken habe, aber hier soll nur der Beitrag zur Erstellung dieser Arbeit genannt werden. Meinen Kindern Annica Schneider und Niclas Schneider danke ich für ihr Verständnis für meine arbeitsbedingte häufige Abwesenheit und Niclas besonders für die Unterstützung beim Bau des Fischertechnik-Roboter-Modells, das häufig zur Veranschaulichung diente. Meiner Frau Nina Schneider bin ich sehr dankbar für ihre generelle Unterstützung und die Bereitschaft zu zahlreichen Gesprächen deutlich außerhalb ihrer eigenen fachlichen Interessensgebiete. Und meiner Mutter Otwine Schneider, der ich natürlich ebenfalls viel mehr zu verdanken habe, danke ich an dieser Stelle besonders für ihre jahrzehntelange Förderung meiner technischen Interessen, ohne die diese Arbeit niemals entstanden wäre.

Trier, im März 2020

Marcus Schneider

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	ix
Tabellenverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Ausgangssituation und Problemstellung	4
1.3 Zielsetzung der Arbeit	9
1.4 Aufbau der Arbeit	12
2 Grundlagen und Begriffsdefinitionen	15
2.1 Definitionen und Umfeld	16
2.1.1 Industrie 4.0 und Industrial Internet of Things (IIoT)	16
2.1.2 Smart Manufacturing	18
2.1.3 Cyber-Physische Systeme	19
2.2 Mensch-Roboter-Interaktion	20
2.2.1 Formen der Zusammenarbeit	22
2.2.2 Sicherheit der Interaktion	23
2.2.3 Die Schnittstelle Mensch-Maschine	26
2.3 Montage variantenreicher Produkte	28
2.3.1 „Mass Customization“	28
2.3.2 Produktkonfiguration	31

2.4	Grundlegende Standards	31
2.4.1	AutomationML	32
2.4.2	OPC UA	33
2.4.3	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0	36
2.5	Zusammenfassung	37
3	Stand der Wissenschaft und Technik	39
3.1	Stand der Forschung	39
3.1.1	Cyber-Physische Systeme und kollaborative Robotik	42
3.1.2	Kollaborationsgerechtes Informationsmanagement	47
3.1.3	Fähigkeitsbasierte Produktionsplanung	50
3.1.4	Anwendung und Kombination von Standards	56
3.1.5	Virtuelle Absicherung und Simulation der Montage	59
3.1.6	Persistierung und Rückführung von Prozess- und Qualitätsdaten in Planung und Konstruktion	61
3.2	Stand der Technik in der Industrie	62
3.3	Zusammenfassung	65
4	Methodik für das Informationsmanagement	67
4.1	Entwicklung der Anforderungen	68
4.2	Manufacturing Integration Bus	74
4.3	Produkt- und Anlagen-Lebenszyklus	81
4.4	Digitaler Zwilling	86
4.5	Steuerung der kollaborativen Zelle	92
4.6	Persistierung von Prozessdaten	99
4.7	Monitoring und Analyse kollaborativer Prozesse	105
4.8	Zusammenfassung	110
5	Validierung	113
5.1	Vorgehensweise zur Validierung	113
5.2	Demonstrator mit minimalem Funktionsumfang	114
5.3	Demonstrator mit erweitertem Funktionsumfang	123

5.4	Industrielle Anlage in Inbetriebnahme	127
5.5	Zusammenfassung	131
6	Zusammenfassung und Ausblick	133
6.1	Zusammenfassung	133
6.2	Ausblick	135
	Literatur	137
A	Anhang	151
A.1	Vergößerte grafische Darstellungen	151
A.2	CollabML	159
A.2.1	Definition (XSD)	159
A.2.2	Beispiel (XML)	161

Abbildungsverzeichnis

1.1	Multifunctional Gate Box 2 (MGB2) der Fa. Euchner	6
1.2	Verlagerung von Ressourcen und Validierungsverfahren in die frühen Phasen der Entwicklung	7
1.3	Beziehung zwischen den Lebenszyklen von Produkt und Pro- duktionsanlage	7
1.4	Beispiel für einen kollaborativen Arbeitsplatz	9
1.5	Aufbau der Arbeit	14
2.1	Vier industrielle Revolutionen	17
2.2	Industrial Internet of Things (IIoT) als Schnittmenge	19
2.3	Arbeitsräume von Mensch und Roboter	23
2.4	Verschiedene Formen der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter	25
2.5	Ursachen zunehmender Variantenvielfalt	29
2.6	Informationskreis der Mass Customization	30
2.7	Aufbau von AutomationML	32
2.8	OPC UA Architektur	34
2.9	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0	36
3.1	Eingriffsmöglichkeiten des Menschen bei Abweichungen	44
3.2	Arbeits- und Automatisierungskosten	45
3.3	PERFoRM Systemarchitektur	46
3.4	Systemarchitektur OPC-UA-Server für ABB Roboter	50
3.5	Fähigkeitsbasierte Produktionsplanung (PPR)	52

3.6	Produktionsplanung nach dem SkillPro-Ansatz	53
3.7	Im Skillpro-Projekt verwendete Arten von Skills	55
3.8	Skillpro Systemarchitektur	56
3.9	Plug-and-Produce-Architektur mit Manufacturing Service Bus	58
3.10	Systemarchitektur mit Station Controller und Simulation	60
3.11	Integriertes Gesamtkonzept zur Datenbereitstellung	61
3.12	Grade der Kollaboration in 25 Anwendungsfällen	64
3.13	Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies 2018	65
4.1	Prozessdaten im Kreislauf der kontinuierlichen Produktionsop- timierung.	74
4.2	Übersicht zur Rolle des Manufacturing Integration Bus	76
4.3	Manufacturing Integration Bus und Datenströme	78
4.4	Komponenten der Methodik im Überblick	80
4.5	Lebenszyklen von Produkt und Anlage	82
4.6	Workflow Planung und Montage einer Variante	83
4.7	Die KoKoMo-Methode im Überblick	85
4.8	Stufen der Nutzung des Digitalen Zwillings	89
4.9	Nutzung des Digitalen Zwillings zur Simulation der kollabora- tiven Montage	90
4.10	Datenmodell für CollabML	94
4.11	Beispiel-Montageablauf mit CollabML	95
4.12	Steuerung kollaborativer Arbeitsschritte	97
4.13	OPC UA Aggregation	102
4.14	Persistierung, Monitoring und Analyse auf Basis von OPC UA	104
4.15	Unterschied zwischen Monitoring und Analyse	109
5.1	Fischertechnik Minimal-Demonstrator Gesamtüberblick	116
5.2	Fischertechnik Minimal-Demonstrator Pneumatischer Greifer	117
5.3	Fischertechnik TXT Controller	118
5.4	Architektur-Überblick Fischertechnik Minimal-Demonstrator	119

5.5	Kollaborative Arbeitsplanung auf OPC-UA-Basis	120
5.6	Vom OPC-UA-Logger gefüllte Tabelle mit Zustandswerten des Roboters	121
5.7	Darstellung der OPC-UA-Knoten und ihrer aktuellen Werte im Client.	122
5.8	Statistische Analyse der Werkerzeit	123
5.9	Foto des KoKoMo Demonstrators	124
5.10	Systemüberblick am Demonstrator mit erweitertem Funktionsumfang	125
5.11	Systemarchitektur des Demonstrators mit erweitertem Funktionsumfang	126
5.12	Kollaborationsbereich an der Anlage bei Fa. Euchner	129
A.1	Vergrößerung: Beziehung zwischen den Lebenszyklen von Produkt und Produktionsanlage	152
A.2	Vergrößerung: Die KoKoMo-Methode im Überblick	153
A.3	Vergrößerung: Übersicht zur Rolle des Manufacturing Integration Bus	154
A.4	Vergrößerung: Persistierung, Monitoring und Analyse auf Basis von OPC UA	155
A.5	Vergrößerung: Fischertechnik Minimal-Demonstrator Gesamtüberblick	156
A.6	Vergrößerung: Foto des KoKoMo Demonstrators	157
A.7	Vergrößerung: Systemarchitektur des Demonstrators mit erweitertem Funktionsumfang	158

Tabellenverzeichnis

2.1	Unterschiedliche Stärken von Mensch und Roboter	21
2.2	Formen der Interaktion zwischen Mensch und Roboter	24
4.1	Zeitebenen bei der Verwertung von Prozessdaten	100
5.1	Implementierte Teile der Methodik in den unterschiedlichen Fallbeispielen	115

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
AMS	Asset Management System
AutomationML	Automation Markup Language
BIS	Business Integration Suite (Seeburger)
BPEL	Business Process Execution Language
CAEX	Computer Aided Engineering Exchange
CIM	Computer-Integrated Manufacturing
Cobot	Collaborative Robot
COLLADA	COLLABorative Design Activity
CPS	Cyber-Physical System
CPPS	Cyber-Physical Production System
EIS	Enterprise Information System
ERP	Enterprise Resource Planning
HMI	Human Machine Interface
IIoT	Industrial Internet of Things
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol

- IT** Information Technology
- KPI** Key Performance Indicator
- M2M** Machine to machine
- MES** Manufacturing Execution System
- MQTT** Message Queuing Telemetry Transport
- MRK** Mensch-Roboter-Kollaboration
- MSB** Manufacturing Service Bus
- OPC** Open Platform Communications
- OPC UA** OPC Unified Architecture
- PDM** Product Data Management
- PLM** Product Lifecycle Management
- PPR** Product Process Resource (Model)
- RAMI 4.0** Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
- RDBMS** Relationales Datenbank Management System
- SDK** Software Development Kit
- SEE** Skill Execution Engine
- SFTP** Secure File Transfer Protocol
- SOA** Service Oriented Architecture
- SOAP** Simple Object Access Protocol
- SPS** Speicherprogrammierbare Steuerung
- VR** Virtual Reality

1 Einleitung

In diesem einführenden Kapitel wird zunächst die Motivation dargelegt, eine Methodik für das Informationsmanagement bei der interaktiven kollaborativen Montage variantenreicher Produkte zu etablieren (Abschnitt 1.1). Darauf aufbauend wird im folgenden Abschnitt 1.2 die Ausgangssituation beschrieben und die zentrale Problemstellung formuliert, die dann in Abschnitt 1.3 zur Zielsetzung der vorliegenden Arbeit führt. Diese wird durch mehrere Forschungsfragen weiter präzisiert und in den weiteren Hauptkapiteln häufig referenziert. Der letzte einleitende Abschnitt 1.4 gibt einen Überblick über den Aufbau der Arbeit.

1.1 Motivation

Zwischen der seit etlichen Jahrzehnten etablierten Massenproduktion von Gütern und der noch länger existierenden vollständig kundenindividuellen Herstellung einer Ware bildet sich in den letzten Jahren eine Produktionsweise aus, die die beiden Vorzüge der vorgenannten traditionellen Wege zu vereinen sucht. Der sich in Richtung individueller Lösungen entwickelnden Nachfrage soll ein effizientes Angebot basierend auf modularen Systemen entgegenkommen, das die Herstellung individueller Produktvarianten (nahezu) zum Preis eines Massenprodukts ermöglicht. Dazu gestalten viele produzierende Unternehmen ihre Produkte als Baukastensystem, das aus in großen

Stückzahlen hergestellten einzelnen Modulen besteht, die erst in der Montage aufgrund der zahlreichen daraus herstellbaren Varianten des Endprodukts ein individuelles Produkt bilden. In den Produktionsschritten vor der Montage nutzen die Unternehmen den hohen Wiederverwendungsgrad und die Möglichkeiten zur Standardisierung der Komponenten (Kluge 2011). Zur Montage der unterschiedlichen Varianten solcher Produkte kommt es auf die Flexibilität und Wandelbarkeit der Montagesysteme und -prozesse an, insbesondere auch vor dem Hintergrund der angestrebten Wirtschaftlichkeit (Steinbauer 2012). Die Lücke zwischen der flexiblen und mit relativ geringen Investitionen verbundenen durch Arbeiter durchgeführten Montage und einer nur bei großen Stückzahlen wirtschaftlich attraktiven Vollautomatisierung kann die kollaborative Montage, bei der Mensch und Roboter gemeinsam ein Produkt montieren, zumindest teilweise schließen. Dabei können die besonderen Fähigkeiten des Roboters wie Kraft oder Präzision mit der Flexibilität und fehlertoleranten Arbeitsweise des Menschen kombiniert werden.

Neben zahlreichen weiteren Fragen wie zum Beispiel der Auswahl des Robotertyps für kollaborative Montage, der Aus- und Weiterbildung der Mitarbeiter oder auch der Berücksichtigung von Sicherheitsaspekten kommt dem Informationsmanagement eine Schlüsselrolle beim Einsatz kollaborativer Montagesysteme zu, denn sie tragen zu Effizienz und damit Wirtschaftlichkeit der Rekonfiguration wesentlich bei. Dabei kommt es einerseits auf die adäquate Bereitstellung aller erforderlichen Betriebsdaten insbesondere zur Steuerung der Montageprozesse innerhalb der kollaborativen Zelle an. Andererseits müssen die bei der tatsächlichen Montage gewonnenen Prozessdaten persistiert und aggregiert für den nächsten Engineering-Zyklus zur Verfügung gestellt werden, damit sie als Basis einer kontinuierlichen Optimierung dienen können. Diese Aspekte sind bei der kollaborativen Montage von weitaus größerer Bedeutung als bei der konventionellen Montage.

Die wichtigsten Aspekte und Fragestellungen zur Motivation eines integrieren kollaborationsgerechten Informationsmanagements sind schlagwortartig:

- Flexible kollaborative Montage
- Re-Engineering und Konfiguration
- Anpassung an neue Varianten
- Aufgabenteilung zwischen Mensch und Roboter
- Wirtschaftlichkeit

Ein integrierter Ansatz für das Wissens- und Prozessmanagement zur Gewährleistung einer effizienten kollaborativen Montage muss dabei einerseits die Produktentstehung unterstützen und andererseits die Steuerung und Organisation der Montageprozesse selbst umfassen. Dabei kommen mehrere Zeitebenen von der langfristig orientierten Planung über die kurzfristige Steuerung einzelner Arbeitsschritte bis hin zur Echtzeit-Interaktion in Frage. Gleichzeitig sind der Übergang von der klassischen Automatisierungspyramide zu einer umfassenderen und flexibleren Gestaltung der Informationsflüsse im Sinne des Referenzarchitekturmodells 4.0 und die Verwendung aktueller Standards wie OPC UA zu berücksichtigen. Obwohl bereits einige Ansätze für die Planung kollaborativer Prozesse (Dumonteil u. a. 2015) und Methoden virtueller Erprobung (R. Stark, Kind und Neumeyer 2017) existieren, gibt es derzeit noch keinen umfassenden Ansatz für ein konsolidiertes Informationsmanagement bei der kollaborativen Montage variantenreicher Produkte.

Die vorliegende Arbeit soll diese Lücke mit einer Methodik zum Wissens- und Prozessmanagement bei der interaktiven kollaborativen Montage variantenreicher Produkte schließen. Dazu wird eine Kombination mehrerer

Methoden entwickelt und vorgestellt, die die Integration aller in diesem Kontext benötigten Informationen ermöglicht und auf aktuellen Paradigmen und Standards basiert.

1.2 Ausgangssituation und Problemstellung

Die Fähigkeit, auf sich wandelnde Anforderungen und Märkte reagieren zu können, ist für produzierende Unternehmen essenziell (Warnecke 1996). Eine von vielen Möglichkeiten diese auszubauen ist die Einbeziehung der kollaborativen Montage variantenreicher Produkte in dafür geeigneten Fällen. Unterstützt werden kann sie durch die Anwendung von Produktlebenszyklusmanagementansätzen (PLM), die auch die Wirtschaftlichkeit flexibler Montageplätze steigern (Eigner und Stelzer 2009). Einzelne Komponenten oder integrierte Ansätze von PLM kommen in fast allen produzierenden Unternehmen zum Einsatz, jedoch existieren nur wenige anwendbare Ansätze für den Bereich der kollaborativen Montage, die an ein PLM-Konzept erweiterte spezielle Anforderungen stellt. Da es sich gemäß den *Liebensteiner Thesen* (siehe auch Abschnitt 4.1) nicht um eine Lösung, sondern um ein „unternehmensspezifisches Konzept“ handelt, kann es einerseits auch keine einheitliche Lösung für die kollaborative Montage variantenreicher Produkte geben. Andererseits ist es dennoch möglich, übergeordnete und in vielen Fällen auftretende Anforderungen zu identifizieren, die dann im Einzelfall geprüft und angepasst werden müssen.

In Anlehnung an die VDI Richtlinie 2860 lässt sich der Begriff „Kollaborative Montage“ wie folgt definieren:

Kollaborative Montage ist die Gesamtheit aller Vorgänge für den Zusammenbau von Körpern mit geometrisch bestimmter Form durch mindestens einen Roboter und mindestens einen Menschen in einem gemeinsamen Arbeitsraum.

Durch Einbeziehung weiterer Kriterien, insbesondere gemeinsam genutzter Ressourcen wie Zeit und Raum, kann die Art der Kollaboration präzisiert werden (siehe auch Unterabschnitt 2.2.1). Insbesondere zur Montage variantenreicher Produkte und Produktfamilien kann die kollaborative Montage einen Beitrag zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit leisten.

Varianten sind technische Systeme mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Komponenten, die Ähnlichkeiten in Bezug auf Geometrie, Material oder Technologie aufweisen. Varianten unterscheiden sich voneinander in mindestens einer Beziehung oder einem Element. Unterschiede existieren bezüglich der Ausprägungen mindestens eines Merkmals (Ponn und Lindemann 2008).

Ein typisches Beispiel für ein aus einzelnen kombinierbaren Modulen bestehendes Produkt, das dadurch auf Basis relativ weniger Komponenten in zahlreichen Varianten erhältlich ist, ist die Multifunctional Gate Box 2 (MGB2) der Euchner AG (siehe auch Abbildung 1.1). Es handelt sich dabei um ein Verriegelungs- oder Zuhaltungssystem zur Absicherung von Schutztüren an Maschinen und Anlagen, das aus mehreren Modulen individuell zusammengestellt werden kann. Dabei ist das Zuhaltmodul selbst auch wiederum aus einzelnen Submodulen (mit Bedien- und Anzeigeelementen) kombinierbar, die nach Kundenwunsch montiert werden. Die Montage dieser Submodule dient auch als Grundlage der Fallstudie im Rahmen der Validierung in Abschnitt 5.4.

Die Vorgehensweise zur Montage jeder einzelnen Variante muss unter verschiedenen Aspekten wie zum Beispiel Machbarkeit und Sicherheit geprüft werden. Daher ist es sinnvoll die Methoden des Virtual Engineering, insbesondere zur Verlagerung von Ressourcen und Validierungsverfahren in den frühen Phasen der Entwicklung zum Einsatz zu bringen. Damit wird die Entwicklungszeit einer einzelnen Variante verkürzt und dadurch die Flexibilität



Abbildung 1.1: Multifunctional Gate Box 2 (MGB2) der Fa. Euchner als Beispiel für ein modulares variantenreiches Produkt. Quelle: <https://www.euchner.de/de-de/produkte/multifunctional-gate-box-mgb2/> (abgerufen am 16.09.2019).

erhöht. Wenn es gelingt, die bei der Montage anderer Varianten entstandenen Prozessdaten geeignet auszuwerten und in das Engineering einer neuen Variante einfließen zu lassen, verringert sich somit auch das Kostenrisiko in späteren Phasen der Produktentstehung (siehe auch Abbildung 1.2). Bei klassischer Vorgehensweise hingegen wäre das Risiko höher, bei einem späteren Schritt in der Produktentstehung auf Probleme zu stoßen, was im ungünstigsten Fall jede neue Variante betreffen könnte.

Im Laufe der Produktentstehung wird also hauptsächlich an den digitalen Modellen von Produkt und Anlage gearbeitet, die jeweils aus verschiedenen Konstruktionsdaten, Beschreibungen der Funktionalität oder Anleitungen zur Montage bestehen. So entsteht ein Digitaler Zwilling des Produkts und der Anlage selbst, der im Fall des Produkts für eine Klasse von Objekten steht, die im Moment der Herstellung instanziiert wird (siehe auch Abbildung 1.3). Diese einzelnen Instanzen erhalten weitere Eigenschaften wie zum Beispiel eine Seriennummer oder Prüfdaten. Auch der Digitale Zwilling der Produkti-

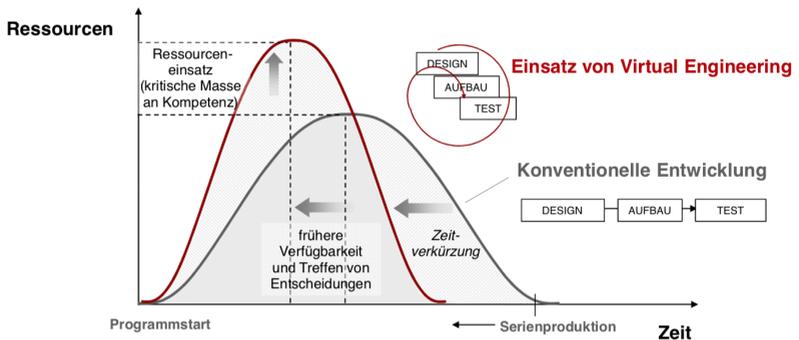


Abbildung 1.2: Verlagerung von Ressourcen und Validierungsverfahren in die frühen Phasen der Entwicklung. Verändert nach Ovtcharova (2010)

onsanlage wird zum Zeitpunkt der Montage mit weiteren Daten angereichert, insbesondere Prozessdaten, die während der Montage erfasst werden.

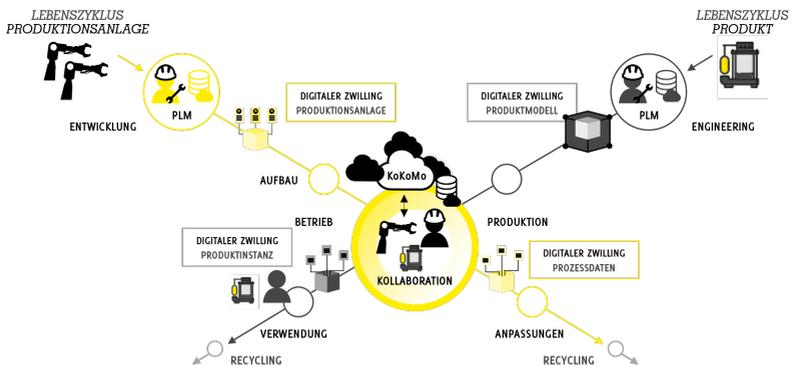


Abbildung 1.3: Beziehung zwischen den Lebenszyklen von Produkt und Produktionsanlage (Herfs, Storms, Rogendorf, Petrovic, Schubert, Schneider, Erkayhan, Rückert, Tracht und Heinen 2019, S. 55). Vergrößerung in Abbildung A.1 auf Seite 152.

Aufgrund der Vielzahl an entstehenden und nutzbaren Daten ist ein dediziertes Informationsmanagement für die kollaborative Montage erforderlich, das einerseits die Planung und die Steuerung der Montage unterstützt und

andererseits die während oder nach der Montage gewonnenen Daten adäquat für spätere Planungszyklen zur Verfügung stellt, also alle in Abbildung 1.3 dargestellten Stationen umfasst. Daraus kann die folgende Problemstellung abgeleitet werden:

Problemstellung der Arbeit

Es ist ein an die kollaborative Montage variantenreicher Produkte angepasstes Informationsmanagement erforderlich, um diese –insbesondere unter wirtschaftlichen Aspekten– zu ermöglichen.

Einzelne Aspekte dieses Problems sind dabei:

- die Integration aller beteiligten Systeme und Prozesse
- der Umgang mit den Digitalen Zwillingen
- die Steuerung der kollaborativen Montage
- die Persistierung der Prozessdaten
- das Monitoring und die Analyse der Prozessdaten

In Abbildung 1.4 ist beispielhaft ein kollaborativer Arbeitsplatz dargestellt. Der Werker im Vordergrund arbeitet zeitgleich mit einem Leichtbauroboter im selben Arbeitsraum. Neben weiteren Werkzeugen ist auch das Terminal erkennbar, über das die Interaktion gesteuert werden kann.

Die Anforderungen, die sich aus dieser Problemstellung an ein Informationsmanagement für die kollaborative Montage variantenreicher Produkte ergeben, werden im folgenden Abschnitt 1.3 als Ziele dieser Arbeit definiert und in Form von Forschungsfragen formuliert. In ihrer Gesamtheit lösen die Antworten darauf das oben genannte Problem.



Abbildung 1.4: Beispiel für einen kollaborativen Arbeitsplatz. Quelle: Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen (BIME).

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Im vorhergehenden Kapitel konnte der Bedarf für ein die kollaborative Montage variantenreicher Produkte unterstützendes Informationsmanagement gezeigt werden. Zwar gibt es zahlreiche etablierte Ansätze für das Wissens- und Prozessmanagement bei der traditionellen und automatisierten Montage, eine auf die besonderen Herausforderungen der kollaborativen Montage zugeschnittene Methodik jedoch noch nicht. Insbesondere die sich nur bei der kollaborativen Montage ergebenden Fragen wie zum Beispiel die nach der geeigneten Steuerung der kollaborativen Zelle oder der Aufteilung des Arbeitsplans zwischen Mensch und Roboter sind bisher noch offen.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die dieser Arbeit zu Grunde liegende **Hauptforschungsfrage**

F0: Wie kann ein integriertes Informationsmanagement die kollaborative Montage und deren stetige Anpassung an die wech-

selnden Anforderungen verschiedener Varianten eines Produkts unterstützen?

Daraus können wiederum einzelne Teilforschungsfragen abgeleitet werden, die einzelne Aspekte der Hauptforschungsfrage **F0** adressieren und deren Beantwortung in Gesamtheit auch die Beantwortung der Hauptforschungsfrage **F0** erlaubt.

An der kollaborativen Montage variantenreicher Produkte sind im Allgemeinen zahlreiche Systeme beteiligt, die jeweils eigene Anforderungen bezüglich ihrer Steuerung und Kontrolle, aber auch bezüglich der bei ihrer Aktivität entstehenden Prozessdaten mit sich bringen. Die in dieser Landschaft erforderlichen Informationsflüsse müssen integriert und den jeweils anderen Komponenten zugänglich gemacht werden. Die erste Teilforschungsfrage lautet also:

F1: Wie können die Informationsflüsse der verschiedenen beteiligten Komponenten eines kollaborativen Montagesystems integriert werden?

Bei der Montage variantenreicher Produkte erhöht sich die Komplexität der Anlagen, was den klassischen Ansatz zur Planung und Architektur dieser Systeme an seine Grenzen bringen kann (R. Stark, Kind und Neumeyer 2017). Ein möglicher Ansatz zur Überwindung dieser Begrenzungen sind cyber-physische Systeme, deren digitale Komponente eine einfachere Anpassung an veränderte Produkthanforderungen ermöglicht. Es stellt sich daher die Frage:

F2: Wie kann ein virtuelles digitales Abbild der physischen Komponenten der kollaborativen Montagezelle zur Verbesserung der Sicherheit und Effizienz der Montage genutzt werden?

Aber nicht nur bei der Planung und Inbetriebnahme, sondern auch bei der Steuerung der Montage in einer kollaborativen Zelle stellen sich neuartige Fragen, insbesondere wenn es um das Problem geht, welcher Arbeitsschritt vom Roboter und welcher vom Werker übernommen werden kann oder muss und welche nur gemeinsam bewältigt werden können. Ein klassischer Automatisierungsansatz ist hier nicht ausreichend und würde die besonderen Möglichkeiten der Kollaboration vernachlässigen, die Flexibilität bei der Aufteilung bringen und brauchen. Dies adressiert die Teilforschungsfrage:

F3: Wie können bei der Steuerung der Montagezelle die besonderen Aspekte der kollaborativen Montage berücksichtigt werden?

Die bis zu dieser Stelle berücksichtigten Fragestellungen bezogen sich auf Phasen des Produktentstehungsprozesses, die vor Beginn der eigentlichen Montage liegen. Während der Montage entstehen durch die Steuerung und deren Ablauf, aber auch durch verschiedene Sensoren und Messgeräte Prozessdaten, die in verschiedener Weise zur Optimierung des Montageprozesses selbst genutzt werden können und sollten. Dazu sind moderne Verfahren notwendig, diese Daten zu aggregieren, zu persistieren und für weitere Schritte zur Verfügung zu stellen. Daher lautet eine weitere Teilforschungsfrage:

F4: Wie können die bei der kollaborativen Montage entstehenden Prozessdaten persistiert und zur weiteren Nutzung bereitgestellt werden?

Aus den Prozessdaten können Schlüsse zur weiteren Optimierung der Montageprozesse gezogen werden, indem diese adäquat ausgewertet werden. Dies kann grundsätzlich auf mindestens zwei zeitlichen Horizonten geschehen:

- *während* der Montage mit dem Ziel der Beeinflussung des weiteren Verlaufs der Montage und

- *nach* der Montage zur Optimierung späterer Montageprozesse.

Im ersten Fall spricht man von Monitoring, im zweiten Fall soll hier von Analyse die Rede sein. Da der zweite Fall im Gegensatz zum ersten nicht zeitkritisch ist, stehen hier auch umfassendere und zeitaufwändigere Methoden zur Verfügung. Zum ersten Fall stellt sich daher die Frage:

F5: Wie können die Prozessdaten während der kollaborativen Montage überwacht werden?

Im zweiten Fall (Analyse) sollen die Ergebnisse in spätere Engineering-Prozesse, zum Beispiel anderer Varianten des selben Produkts, einfließen. Es ergibt sich also ein Zyklus zwischen tatsächlicher Montage und Engineering, der vielfach durchlaufen werden kann. Im Hinblick auf die Auswertung beobachteter Prozessdaten ergibt sich daraus die letzte Teilforschungsfrage:

F6: Wie kann die Analyse der Prozessdaten im Engineering-Prozess neuer Produktvarianten berücksichtigt werden?

Die meisten dieser Fragestellungen bewegen sich im interdisziplinären Bereich zwischen Maschinenbau und Informatik, aber auch betriebswirtschaftliche und arbeitsrechtliche Überlegungen spielen eine Rolle. Ziel dieser Arbeit ist vor diesem Hintergrund die Entwicklung einer Methodik zum Informationsmanagement, die alle oben erläuterten Fragestellungen umfasst und damit auf der Informationsebene die Möglichkeiten der kollaborativen Montage ermöglicht oder unterstützt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Der auch in Abbildung 1.5 dargestellte Aufbau der Arbeit folgt der zur Beantwortung der Forschungsfragen (siehe oben) erforderlichen Vorgehensweise.

In diesem einleitenden Kapitel wurde die Motivation skizziert und die Ausgangssituation und Problemstellung dargestellt. Auf dieser Basis wurden die Hauptforschungsfrage **F0** und die Teilforschungsfragen **F1** bis **F6** zur Umschreibung der Zielsetzung formuliert.

Im folgenden Kapitel 2 werden einige **Grundlagen** des Themengebiets dargestellt, zentrale Begriffe definiert und aktuelle Standards, die ebenfalls eine Basis der Methodik darstellen, zusammenfassend erläutert.

Das Kapitel 3 zum **Stand der Wissenschaft und Technik** fasst bisherige Untersuchungen auf dem Gebiet des Informationsmanagements und zur kollaborativen Montage zusammen und enthält auch ein Unterkapitel zum Stand der Technik in der Industrie.

Das Kapitel 4 ist von zentraler Bedeutung und stellt die verschiedenen Teilbereiche der **Methodik** entsprechend den oben formulierten Forschungsfragen dar. Die Anforderungen an die Methodik werden entwickelt und anschließend die einzelnen Komponenten der Gesamtmethodik in den Unterkapiteln vorgestellt.

Die **Validierung** der zuvor dargelegten Methodik ist Gegenstand des Kapitels 5. Nach der Vorstellung und Erläuterung des zur Validierung verwendeten Ansatzes wird die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methodik in drei Bereichen validiert: an einem Minimal-Demonstrator, an einem Demonstrator mit erweitertem Funktionsumfang und an einer industriellen Anlage in Inbetriebnahme. Dabei rücken jeweils bestimmte unterschiedliche Aspekte und Teilbereiche der gesamten Methodik in den drei verschiedenen Szenarien in den Fokus.

Abschließend fasst das Kapitel 6 als **Schlussbetrachtung** die zentralen Aspekte der vorigen Kapitel zusammen, anschließend werden in einem Ausblick mögliche zukünftige Entwicklungen und Forschungsthemen besprochen.



Abbildung 1.5: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen und Begriffsdefinitionen

„Industrie 4.0“ steht als Begriff nicht nur für ein interdisziplinäres weites Feld an Methoden und Anwendungen, sondern stellt auch eine umfassende Initiative zur Modernisierung der industriellen Produktion dar. Entscheidendes Merkmal dieser Entwicklung ist die Vernetzung aller relevanten Elemente und damit die Kommunikationstechnologie, die es modernen Anlagen wie cyber-physischen Systemen erlaubt, „smart“ zu agieren. Ziele sind neben ökonomischen Verbesserungen auch die Individualisierung der Produkte und engere Einbindung der Produktion in komplexe Lieferketten, um nur einige zu nennen. Mit dem menschlichen Werker kollaborierende Roboter können dazu einen Beitrag leisten, auch wenn mit der Gewährleistung der Arbeitssicherheit eine große Herausforderung vor die Anwendung gestellt ist. Etablierte Standards stellen die Basis für die Kommunikation aller Komponenten dar: mit AutomationML steht eine XML-basierte Beschreibungssprache zur Verfügung, in der auch komplexe Anlagen abgebildet werden können. Ein weiteres mächtiges und im Kontext der vorliegenden Arbeit relevantes Werkzeug ist OPC Unified Architecture (OPC UA), das nicht nur ein Datenmodell, sondern auch Protokolle und Lösungen für Sicherheitsfragen und weitere Module bereithält. Eine Einordnung der vorliegenden Arbeit in das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0), das den theoretischen Rahmen bildet, rundet dieses Kapitel ab.

2.1 Definitionen und Umfeld

2.1.1 Industrie 4.0 und Industrial Internet of Things (IIoT)

Nach der ersten (eigentlichen) industriellen Revolution gab es je nach zu Grunde gelegten Kriterien bis zu drei weitere, die sich jeweils durch einen fundamentalen Wandel der zur industriellen Produktion zur Verfügung stehenden Mittel unterscheiden. Mit jeder weiteren Stufe stieg auch die Komplexität, was neben den damit verbundenen Chancen und Möglichkeiten auch den Bedarf an Methoden und Werkzeugen verstärkte, um diese zu handhaben. International wird die in Deutschland als vierte Stufe gesehene Entwicklung häufig auch als konsequente Fortsetzung der Automatisierung der dritten Stufe betrachtet (siehe auch Abbildung 2.1).

So weit gefächert wie das Themengebiet ist auch die Menge existierender Definitionen für den Begriff „Industrie 4.0“, nach einer Studie des Industrieverbands BITKOM (Bauer und Horváth 2015) gibt es mindestens 104 verschiedene. Die in Deutschland bedeutsame Forschungsplattform *Plattform Industrie 4.0* (2018) bietet die folgende Definition an:

Industrie 4.0 bezeichnet die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mit Hilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie.

Für produzierende Unternehmen können sich daraus zahlreiche Vorteile ergeben, zum Beispiel eine flexiblere digital gesteuerte Produktion mit besserer Auslastung der Maschinen, Erhöhung der Produktivität durch wandelbare Produktionsstraßen, individuellere Produkte nach Wunsch des Kunden, optimierte Logistik und eine ressourcenschonendere Kreislaufwirtschaft, um nur einige zu nennen. (*Plattform Industrie 4.0* 2018)

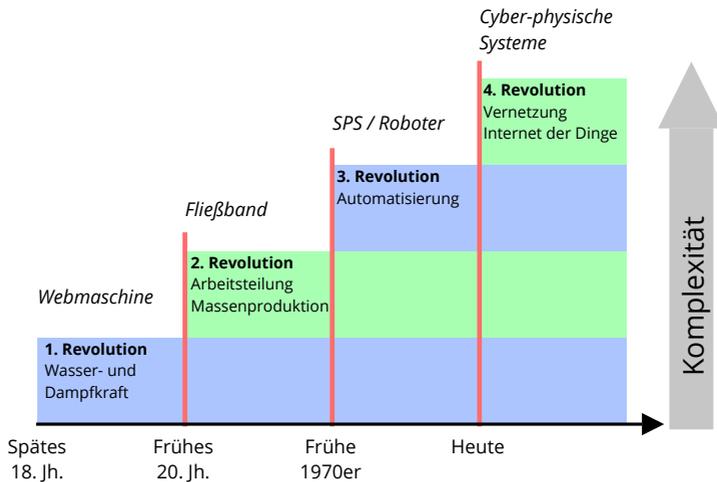


Abbildung 2.1: Vier industrielle Revolutionen und ihre wesentlichen Merkmale. Abbildung in Anlehnung an Thoben, Wiesner und Wuest (2017, S. 5).

Aufgrund der Bedeutung der Industrie und insbesondere des Maschinen- und Anlagenbaus für die deutsche Wirtschaft wurde ein umfassendes Forschungsprogramm, das ebenfalls den Titel „Industrie 4.0“, von der Bundesregierung ins Leben gerufen und mit entsprechenden Mitteln ausgestattet.

Es basiert auf der Annahme, dass die „industrielle Produktion in näherer Zukunft charakterisiert sein wird durch eine starke Individualisierung der Produkte bei sehr flexibler Herstellung, intensive Integration der Kunden und Geschäftspartner in Geschäftsprozesse und die Verbindung der Produktion mit hochwertigen Serviceleistungen, die zu sogenannten hybriden Produkten führt.“ (Schütte 2012 cit. in Thoben, Wiesner und Wuest 2017) Industrie 4.0 steht dabei auch für einen Paradigmenwechsel von der Automatisierung hin zu einem intelligenten Produktionskonzept. Die Grundlage dafür schaffen

Maschinen mit vernetzten Sensoren und Aktoren und Konzepte wie das „Internet der Dinge“.

Das Internet der Dinge („Internet of Things“) ist ein Informationsnetzwerk bestehend aus physischen Objekten wie Sensoren, Maschinen, Fahrzeugen, Gebäuden und anderen Gegenständen, das es diesen Objekten erlaubt zu interagieren und zu kooperieren, um gemeinsame Ziele zu erreichen (Atzori, Iera und Morabito 2010). Die Anwendungsbereiche sind unterschiedlich und umfassen unter anderem den Verkehr, die Gebäudetechnik („Smart Home“), das Gesundheitswesen und die industrielle Produktion. Daher spricht man in letzterem Fall auch von dem „Industrial Internet of Things“ (IIoT), das in Deutschland auch häufig mit dem Begriff „Industrie 4.0“ gleichgesetzt wird. Während der Begriff „Industrial Internet of Things“ eher die technische Seite umschreibt, ist mit „Industrie 4.0“ eher die ökonomische Seite gemeint. Das „Industrial Internet of Things“ führt also in gewissem Sinne zu „Industrie 4.0“ (Jeschke u. a. 2017).

2.1.2 Smart Manufacturing

Ansätze wie Computer-Integrated Manufacturing (CIM), Product Data Management (PDM) und auch Product Lifecycle Management (PLM) waren in den vergangenen rund 30 Jahren wichtige Meilensteine hin zu einer Digitalisierung der industriellen Produktion und dennoch blieb diese auf Teilbereiche begrenzt. Das Ziel der digitalen Fabrik, wie sie aktuell angestrebt wird, ist die Integration aller Daten, Modelle, Prozesse und Software-Werkzeuge, so dass ein vollständiges digitales Modell der realen Fabrik entsteht, das für Kommunikation, Simulation und Optimierung über den gesamten Lebenszyklus genutzt werden kann (Jeschke u. a. 2017). Dabei wird sowohl die Anlage zur Produktion als auch das Produkt selbst digital abgebildet („Digitaler Zwilling“). Es entsteht ein Netzwerk aus Informationsflüssen, in

dem reale und digitale Elemente sich wechselseitig beeinflussen (siehe auch Abbildung 2.2)

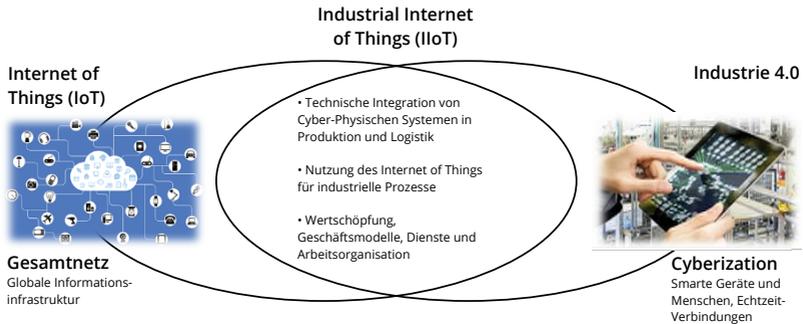


Abbildung 2.2: Industrial Internet of Things (IIoT) als Schnittmenge des Internets der Dinge und der Cyber-Systeme in der Industrie in Anlehnung an Ovtcharova (2019).

Neben technischen Aspekten, die die oben beschriebenen Ansätze teilweise gemeinsam haben und die auch nicht immer scharf gegeneinander abgrenzbar sind, wird beim Smart Manufacturing der Rolle des Menschen mit seinem Einfallsreichtum und Erfindergeist eine besondere Aufmerksamkeit zuteil. Die Möglichkeiten der menschlichen Arbeitskraft sollen nicht durch künstliche Intelligenz und weitere Automatisierung ersetzt, sondern durch neue Werkzeuge erweitert werden. Dabei kommt den Produkt- und Prozessdaten eine besondere Bedeutung zu. (Thoben, Wiesner und Wuest 2017)

2.1.3 Cyber-Physische Systeme

Die NASA (2012) definiert Cyber-Physical System (CPS) wie folgt:

Der Begriff „**Cyber-physische Systeme**“ beschreibt eine aufkommende Klasse von physischen Systemen, die aufgrund sehr leistungsfähiger eingebetteter Softwarekomponenten komplexe

Verhaltensmuster beherrschen. Sie werden auch als hybride Systeme (Hardware und Software) oder als mechatronische Systeme (mechanisch und elektronisch) bezeichnet. Dies umfasst auch Komponenten mit Informationen und Wissen, das ihnen beispiellose Fähigkeiten in Bezug auf Interoperabilität und Interaktion, Belastbarkeit, Anpassungsfähigkeit und emergentes Verhalten verleiht.

Andere Definitionen legen den Schwerpunkt entweder mehr auf den physischen oder den Software-Bereich, betonen weitere Komponenten wie Kommunikation oder Kontrolle oder benennen einzelne Anwendungsgebiete. Kommen CPS in der Industrie zur Produktion zum Einsatz, werden sie als Cyber-Physical Production System (CPPS) bezeichnet.

Unter dem Aspekt des Informationsmanagements führt die zunehmende Verbreitung cyber-physischer Systeme zu einer schrittweisen Ersetzung der etablierten hierarchischen Strukturen der Automatisierungspyramide durch vernetzte, dezentral organisierte und (teilweise) automatisierte Dienste, die auch cloud-basiert sein können. Dies wiederum erfordert neue Modellierungs- und Designtechniken zur Steuerung und Überwachung der Produktionsprozesse. Dabei treten auch neue Herausforderungen bezüglich der Transparenz, Echtzeitfähigkeit, Robustheit und anderer Qualitätsmerkmale der Kommunikation auf. Eine weitere Anforderung entsteht durch die großen Mengen erhobener Daten auf der einen und der Notwendigkeit einer reduzierten Anzeige für den menschlichen Bediener solcher Systeme auf der anderen Seite. (Jeschke u. a. 2017, S. 9f)

2.2 Mensch-Roboter-Interaktion

Hinter Gitterzäunen und in Käfigen agierende Roboter sind ein in der Industrie seit Jahrzehnten vertrautes Bild. Die Arbeitsbereiche von Mensch

und Roboter sind aus Sicherheitsgründen über Jahrzehnte streng getrennt gewesen und daher fand die Montage eines Produkts oder eines Produktteils entweder rein manuell oder voll automatisiert statt. Lediglich eine nacheinander automatisierte und manuelle Ausführung einzelner mehr oder weniger großer Montageschritte war in dieser Situation möglich.

Die Kombination der besonderen Fähigkeiten von Mensch und Roboter, in Tabelle 2.1 überblicksartig dargestellt, entfaltet ein höheres technisches und ökonomisches Potenzial und entlastet den Werker von gefährlichen und belastenden Aufgaben. Eine umfassendere Zusammenstellung dazu geben Bauer, Bender u. a. (2016, S. 24).

Ein zentraler Aspekt der vorliegenden Arbeit ist die gemeinsame Montage eines Produkts durch Mensch und Roboter, die also zur Erreichung dieses Ziels in irgendeiner Form in Interaktion treten müssen. Dies betrifft einerseits die mechanisch-physische Interaktion, die teilweise auch unerwünscht sein kann (siehe Abschnitt 2.2.2), andererseits aber auch die informationelle Schnittstelle zwischen Mensch und Roboter (siehe Abschnitt 2.2.3). Die Art der Interaktion bei der Montage kann dabei, wie in Abschnitt 2.2.1 dargestellt, ganz unterschiedlich sein.

Tabelle 2.1: Unterschiedliche Stärken von Mensch und Roboter

Mensch	Roboter
Flexibilität	Präzision
Hohe Lernfähigkeit	Kraft
Erfahrung	Exakte Wiederholbarkeit
Improvisation	Schnelligkeit

2.2.1 Formen der Zusammenarbeit

Das Kunstwort „Cobot“, zusammengesetzt aus „Collaborative“ und „Robot“, findet seine erste Erwähnung bei Colgate, Wannasuphoprasit und Peshkin (1996) und wird dort wie folgt definiert:

„Ein **'Cobot'** ist ein Roboter, der gemeinsam mit einem menschlichen Bediener Objekte manipuliert.“

Eine spätere Definition der selben Autoren betont zusätzlich den gemeinsamen Arbeitsraum, in dem Roboter und Mensch sich bewegen und arbeiten. Das Vorhandensein dieses gemeinsamen Arbeitsraums, seine Beschaffenheit und der zeitliche Ablauf der darin stattfindenden Prozesse ziehen Bauer, Bender u. a. (2016) als grundlegendes Kriterium zur Unterscheidung verschiedener Stufen der Interaktion zwischen Mensch und Roboter heran (siehe Abbildung 2.3), um die teilweise synonym oder zumindest uneindeutig verwendeten Begriffe „Koexistenz“, „Kooperation“, „Kollaboration“, etc. präzise unterscheiden zu können.

Als Cobots kommen meistens Leichtbauroboter zum Einsatz, die nicht nur leicht transportierbar und aufzustellen sind, sondern auch oft intuitiv bedienbare Programmierschnittstellen haben und über Sicherheitsvorrichtungen wie beispielsweise eine Sensorik zur Kollisionskontrolle verfügen.

Nach Bauer, Bender u. a. (2016) werden basierend auf der Existenz und Nutzung des gemeinsamen Arbeitsraums von Mensch und Roboter die in Tabelle 2.2 erläuterten Formen der Interaktion unterschieden (siehe auch Abbildung 2.4).

Der Fall der echten Kollaboration ist (noch) in der Industrie selten zu finden, die Koexistenz und die Kooperation stellen aktuell noch den Großteil aller in der Praxis angewandten Interaktionsformen dar.

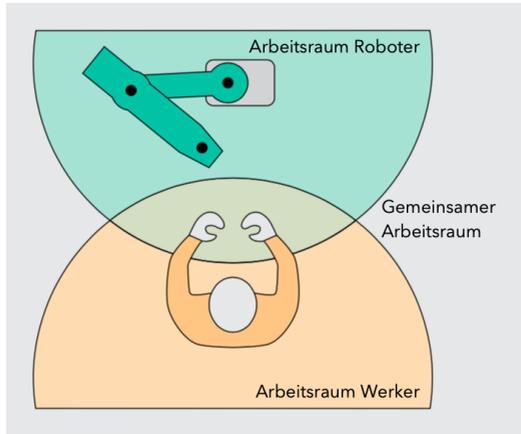


Abbildung 2.3: Arbeitsräume von Mensch und Roboter als Grundlage der Klassifikation des Grades der Zusammenarbeit nach Bauer, Bender u. a. (2016) (verändert). Die Überlappung der beiden Arbeitsräume bildet den gemeinsamen Arbeitsraum.

Im Folgenden wird in einem übergreifenderen Sinne der Begriff „Kollaboration“ bzw. „kollaborativ“ verwendet, da die übrigen Interaktionsformen Spezialfälle der Kollaboration und die dabei zu erwartenden Ereignisse und Problemstellungen jeweils echte Teilmenge der bei der kollaborativen Montage auftretenden Fragestellungen sind.

2.2.2 Sicherheit der Interaktion

Absolute Voraussetzung für den Verzicht auf trennende physische Sicherheitskomponenten wie Schutzzäune und die Errichtung eines gemeinsamen Arbeitsraums für Mensch und Roboter ist die Herstellung der Sicherheit vor Verletzungen des Werkers auf anderem Wege. Dazu kommen verschiedene Ansätze in Betracht, die im Folgenden näher erläutert werden.

Grundsätzlich ist in einem gemeinsamen Arbeitsraum von Mensch und Roboter eine gegenseitige Berührung nicht vollständig auszuschließen. Die

Tabelle 2.2: Formen der Interaktion zwischen Mensch und Roboter in Anlehnung an Bauer, Bender u. a. (2016).

Zelle	Es gibt keine echte Interaktion, da kein gemeinsamer Arbeitsraum existiert, sondern Mensch und Roboter durch einen Schutzzaun physisch voneinander getrennt sind.
Koexistenz	Mensch und Roboter arbeiten nebeneinander, nicht physisch voneinander getrennt durch einen Zaun, aber es existiert kein gemeinsamer Arbeitsraum.
Synchronisiert	Mensch und Roboter haben zwar einen gemeinsamen Arbeitsraum, in dem sich aber immer nur einer von beiden bewegt, so dass die Trennung nicht räumlich, sondern zeitlich erfolgt.
Kooperation	Im gemeinsamen Arbeitsraum von Mensch und Roboter können beide gleichzeitig agieren, arbeiten aber nie am selben Gegenstand, sondern bearbeiten verschiedene Objekte zur selben Zeit.
Kollaboration	Mensch und Roboter arbeiten gleichzeitig und zusammen im gemeinsamen Arbeitsraum am selben Objekt.

technische Spezifikation DIN ISO/TS 15066, die die Sicherheit kollaborativer Roboter zum Gegenstand hat, basiert auf der Prämisse, dass eine solche Berührung nicht zu Schmerzen oder einer Verletzung führen darf. Dies kann häufig durch eine Begrenzung der Robotergeschwindigkeit erreicht werden, die jedoch wiederum einen negativen Einfluss auf die Effizienz hat. Aber auch das Design des Roboters und seiner Werkzeuge kann einen Beitrag zur Sicherheit liefern, zum Beispiel durch sensitive Oberflächen oder Greifer, die konstruktionsbedingt nicht zu Verletzungen führen können.

Die Spezifikation DIN ISO/TS 15066 beschreibt vier Betriebsarten kollaborativer Robotik:

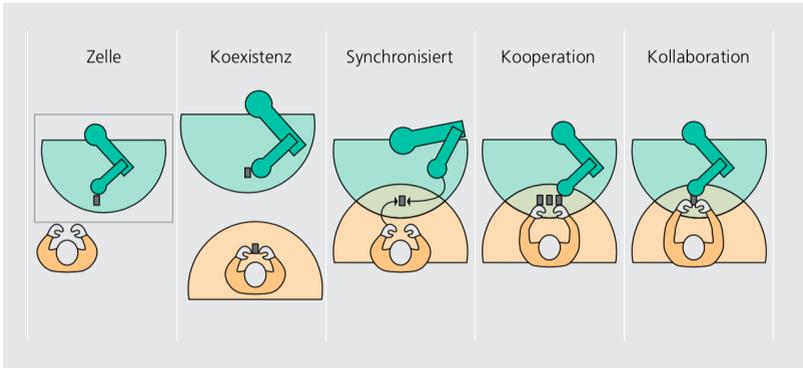


Abbildung 2.4: Verschiedene Formen der Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter unter den Aspekten gemeinsamer Arbeitsräume und Synchronität der Bearbeitung nach Bauer, Bender u. a. (2016).

Sicherheitsbewerteter überwachter Halt

Der Roboter wird vor der Interaktion mit dem Menschen gestoppt. Derartige Anwendungen sind von jedem Industrieroboter ausführbar, auch von solchen, die nicht für Kollaboration vorgesehen sind. Dieser Modus kommt in Frage, wenn der Roboter einen Großteil der Arbeit alleine erledigen kann und der Mensch nur selten eingreift, zum Beispiel um ein Werkzeug zu justieren.

Handführung

Der Roboter wird von Hand geführt und bewegt sich nur mit geringer Geschwindigkeit. Dies dient im Allgemeinen zur Programmierung des Roboters („Teaching“).

Leistungs- und Kraftbegrenzung

Die von dem Roboter maximal ausgehenden Kräfte werden, zusammen mit Leistung und Geschwindigkeit, auf einen Wert reduziert, der nicht zu Verletzungen führen kann. Dabei ist es unerheblich, ob der physische Kontakt zwischen Mensch und Roboter beabsichtigt oder unbeabsichtigt stattfindet.

Dazu gehört auch die Gestaltung des Roboters ohne scharfe Kanten, mit weichen Oberflächen und mit Sensoren, die eine Reaktion auf zu hohe Kräfte ermöglichen.

Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

Durch Sensoren wie Laserschranken oder Kameras wird der gemeinsame Arbeitsraum und die Bewegung des Menschen darin permanent überwacht und die Bewegung des Roboters in Abhängigkeit von dem aktuellen Abstand zum Mensch verlangsamt oder sogar vollständig gestoppt. Mit wieder zunehmendem Abstand des Menschen kann der Roboter dann wieder zu einer schnelleren Bewegung zurückkehren.

2.2.3 Die Schnittstelle Mensch-Maschine

Eine zweckdienliche Kommunikation zwischen Roboter und Mensch ist die Grundlage der Kollaboration und gleichzeitig auch der Sicherheit. Es gibt dabei mehrere Kommunikationsziele, zum Beispiel:

- Programmierung des Roboters
- Synchronisation der Aktionen
- Handlungsanweisungen Mensch ↔ Roboter

Neben einfachen Schaltern, zum Beispiel zur Bestätigung einer Aktion, oder Bildschirmen zur Anzeige von Informationen für den Menschen, können dabei je nach Anwendungsfall auch eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten in Betracht kommen. Dabei ist insbesondere die Qualifikation des Menschen, aber auch der Grad der intuitiven Nutzbarkeit durch den Menschen zu berücksichtigen. Bei der Programmierung des Roboters ist das Lernen durch Führen des Roboters oder Beobachten einer vom Menschen ausgeführten Aktion ein gängiger Ansatz (Papadopoulos u. a. 2017).

Zur Synchronisation der Kollaboration oder Austausch von Anweisungen kommt auch die Steuerung durch natürliche Sprache in Betracht, die einerseits ein großes Potenzial bietet, da sie die für den Menschen natürlichste und schnellste Form der Kommunikation ist. Andererseits ist erkennbar geworden, dass die hohen Erwartungen nicht restlos erfüllt werden können und die Anwendbarkeit der Sprachsteuerung an enge Grenzen gebunden ist (Moore 2017). Insbesondere kann dieser Ansatz auch einer Internationalisierung im Wege stehen. In lauten Arbeitsumgebungen mit vielen Störgeräuschen kann es zu Problemen mit der Sprachsteuerung kommen. In diesem Fall können verschiedene Aktionen des Menschen wie Handgesten oder andere Bewegungen ebenfalls zur Kommunikation verwendet werden, indem sie durch Videokameras erfasst und entsprechend ausgewertet werden. Umgekehrt ist es auch möglich den Roboter bestimmte Gesten (Bewegungsmuster) ausführen zu lassen, deren Bedeutung dem Menschen durch Training oder Intuition bekannt sind (Sheikholeslami, Moon und Croft 2017).

Mit Virtual Reality (VR) und Augmented Reality (AR) stehen weitere Kommunikationswege zur Verfügung, deren Potenzial bei der Anwendung mit kollaborativen Robotern noch Gegenstand der aktuellen Forschung ist. Nicht nur die Programmierung von Roboterbewegungen, sondern auch die Rückmeldung über visuelle, akustische oder haptische Reize kann Gegenstand der VR/AR-Anwendung sein. Unabhängig von der konkreten technischen Realisierung muss in jedem Fall das Hauptaugenmerk bei der Gestaltung der Mensch-Roboter-Interaktion, insbesondere für die kollaborative Montage, auf der Vielfalt der menschlichen Individuen, deren Lernhintergründen und demographischen, ethischen, physischen und sozialen Eigenschaften liegen. (Jost u. a. 2016, S. 7f)

Der Mensch als die mit Abstand flexibelste „Komponente“ kann im Industrie-4.0-Umfeld verschiedenste Rollen einnehmen, wobei seine Hauptaufgabe die Spezifikation und Überwachung der Aufgaben der cyber-physischen Systeme sein wird. Zusätzlich übernimmt er alle erforderlichen manuellen Eingrif-

fe, die erforderlich sind, unterstützt von mobilen kontextsensitiven Schnittstellen und Assistenzsystemen. Damit nimmt er die Rollen eines strategischen Entscheidungsträgers und flexiblen Problemlösers im Gesamtsystem ein. Daraus ergibt sich auch der Bedarf für neue Qualifikationswege, um das erforderliche interdisziplinäre Verständnis für Industrie 4.0 zu schaffen. (Gorecky u. a. 2014)

2.3 Montage variantenreicher Produkte

„Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktion mit in der Regel hohem Anteil identischer Gruppen oder Teile“, so werden in der DIN 199 Varianten definiert. Bei vielen Produkten gibt es die Nachfrage nach verschiedenen Varianten, die zahlreiche Ursachen haben kann, seien es gesetzliche Anforderungen in verschiedenen Ländern oder Absatzmärkten, unterschiedliche Anwendungen oder auch technische Weiterentwicklungen (siehe auch Abbildung 2.5). Die individuellen Kundenwünsche ökonomisch sinnvoll zu erfüllen verlangt von den herstellenden Unternehmen eine effiziente Produktion und ein entsprechendes Varianten- und Komplexitätsmanagement. Dabei wird die Varianz häufig in der Montage durch Modularisierung abgebildet, indem aus einzelnen Teilen oder Baugruppen durch Kombination verschiedene Produkte hergestellt werden.

2.3.1 „Mass Customization“

Das Oxymoron „Mass Customization“, zusammengesetzt aus den beiden Begriffen „Mass Production“ und „Customization“, die sich zu widerspre-

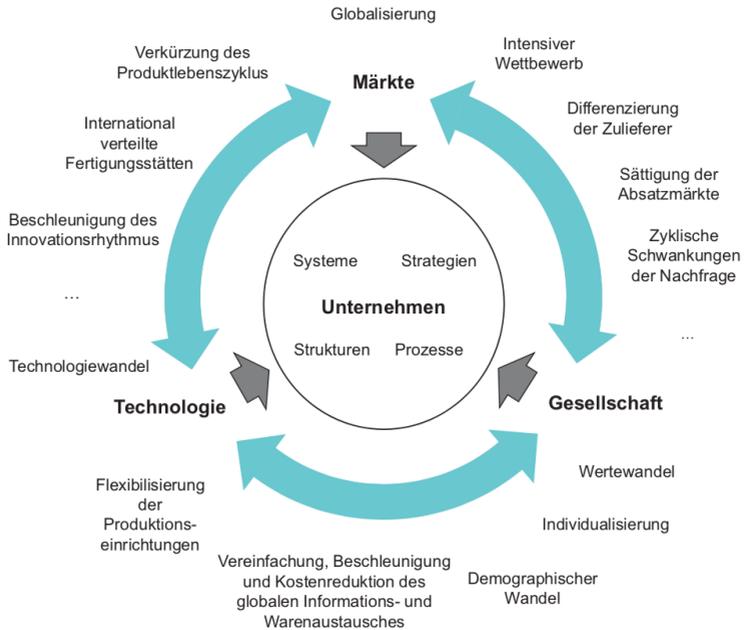


Abbildung 2.5: Ursachen zunehmender Variantenvielfalt nach Grotkamp (2010), zitiert in Thiebes und Plankert (2014, S. 187).

chen scheinen, wurde erstmals von Davis (1987) wie folgt verwendet und definiert:

„**Mass Customization** of markets means that the same large number of customers can be reached as in mass markets of the industrial economy, and simultaneously they can be treated individually as in the customized markets of pre-industrial economies.“

Piller (2006, S. 358), der die deutsche Übersetzung „Kundenindividuelle Massenproduktion“ vorschlägt, sieht in ihr eine „informationsbasierte“ Produktion, in der der Handhabung und Verarbeitung von Information im Wert-

schöpfungsprozess die entscheidende Rolle zukommt.“ Diese Informationsflüsse stellt Abbildung 2.6 schematisch dar.



Abbildung 2.6: Der Informationskreis der Mass Customization in Anlehnung an Piller (2006, S. 359).

Eine Schlüsselrolle beim Informationsmanagement zur kundenindividuellen Massenproduktion kommt Produktkonfiguratoren (siehe auch Unterabschnitt 2.3.2) zu, mit deren Hilfe der Kunde (oder auch der Vertrieb) selbständig regelbasiert seine individuelle Produktvariante zusammenstellen kann. Die kundenindividuelle Massenproduktion wird ökonomisch jedoch erst durch den Einsatz wandlungsfähiger Maschinen und Roboter ermöglicht (Piller 2010).

Während die „Mass Customization“ also die Variantenvielfalt mit den Vorteilen der Massenproduktion zu vereinbaren versucht, geht der bei Y. Wang u. a. (2017) beschriebene Ansatz der „mass personalization“ darüber hinaus und nutzt die Konzepte der Industrie 4.0 zur Herstellung persönlicher Produkte, deren Produktion dennoch kosteneffizient ist.

2.3.2 Produktkonfiguration

Die durch Variation und Auswahl einzelner Komponenten theoretisch herstellbaren Varianten eines Produkts sind bei vielen Produkten äußerst zahlreich. Die maximale Anzahl möglicher Varianten wird im Allgemeinen in der Praxis eingeschränkt durch Regeln ("Constraints"), die bestimmte Kombinationen nicht zulassen, weil sie kein sinnvolles Produkt ergeben. Ein in dieser Arbeit noch mehrfach exemplarisch angeführtes Produkt zur Steuerung von Türzuhaltungen kann einen Not-Stopp-Schalter und andere Bedienelemente beinhalten, die frei wählbar sind. Zwei oder mehrere Not-Stopp-Schalter im selben Produkt miteinander zu kombinieren wäre jedoch nicht sinnvoll, so dass dies durch eine Regel ausgeschlossen wird. Zur Unterstützung des Vorgangs der Konfiguration kommen Produktkonfiguratoren zum Einsatz, die dem jeweiligen Benutzer zulässige Varianten anzeigen und nach abgeschlossener Auswahl eine Beschreibung der Produktvariante generieren. Auf dieser Basis können in nachgelagerten Prozessen weitere Informationen abgeleitet werden, zum Beispiel zur Steuerung der Montage.

2.4 Grundlegende Standards

Die vorliegende Arbeit baut auf mehreren aktuellen Industriestandards auf, die in den letzten Jahren Gegenstand intensiver Forschung waren und die sich bereits auch in der Praxis etabliert haben oder gerade im Begriff sind, sich zu etablieren. Trotz ihrer relativen Aktualität und weiterhin hohen Bedeutung für die laufende Forschung werden sie in den folgenden Unterabschnitten als Grundlagen vorgestellt.

2.4.1 AutomationML

Bei AutomationML¹ handelt es sich um ein offenes XML-basiertes Datenaustauschformat zum Austausch von Engineering-Daten, das in IEC 62714 standardisiert ist. Es dient zur Integration verschiedener Engineering-Werkzeuge über die Disziplinen Mechanisches Design, Elektrisches Design, HMI-Entwicklung oder SPS-Programmierung hinweg bis zur Ansteuerung von Robotern. Dabei ist AutomationML objektorientiert und beschreibt daher Anlagen als hierarchische Objektstruktur auf allen verfügbaren Detaillierungsstufen. Dabei verwendet AutomationML weitere selbständige Formate wie Computer Aided Engineering Exchange (CAEX) oder COLLABorative Design Activity (COLLADA), die in den einzelnen Domänen etabliert sind. Darüber hinaus können zusätzliche XML Formate eingebettet werden, um spezielle weitere Anforderungen zu erfüllen. Auf diese Weise ist der Standard auch offen für zukünftige Entwicklungen und Erweiterungen.

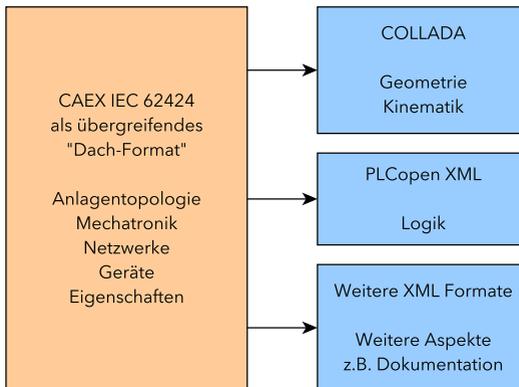


Abbildung 2.7: Schematischer Aufbau von AutomationML in Anlehnung an Lüder und Schmidt (2016, S. 14).

¹ <https://www.automationml.org>

Einzelne Bestandteile des zusammengesetzten AutomationML-Formats und die zugehörigen integrierten Standards sind:

- Topologie: CAEX (IEC 62424)
- Geometrie: COLLADA
- Kinematik: COLLADA
- Logik: PLCopen XML

Die Integration der einzelnen Formate illustriert Abbildung 2.7 auf der vorherigen Seite.

2.4.2 OPC UA

OPC UA ist ein hersteller- und plattformunabhängiges Paket von Standards für den M2M-Datenaustausch im Umfeld der industriellen Automation und wird von der OPC Foundation² gepflegt und weiterentwickelt. Basierend auf früheren Versionen (wie OPC Classic) bietet die OPC Unified Architecture jedoch weit mehr als nur den Zugriff auf aktuelle Daten, sondern umfasst auch deren semantische Beschreibung, die Lösung zahlreicher Sicherheitsaspekte, ein umfassendes und erweiterbares Datenmodell oder auch den Zugriff auf historische Daten. Mit OPC UA wird also nicht nur der Transport im Sinne eines Protokolls beschrieben, sondern auch die Definition von Schnittstellen. Zudem wird die semantische Beschreibung aller Assets erleichtert und der Transport der Daten definiert.

Wesentlicher Teil der serviceorientierten Architektur (SOA) ist auch ein ganzer Stack von Kommunikationsschichten auf Basis des Internetprotokolls (IP). Zur Verfügung stehen zwei verschiedene Übertragungsprotokolle: ein

² <https://opcfoundation.org>

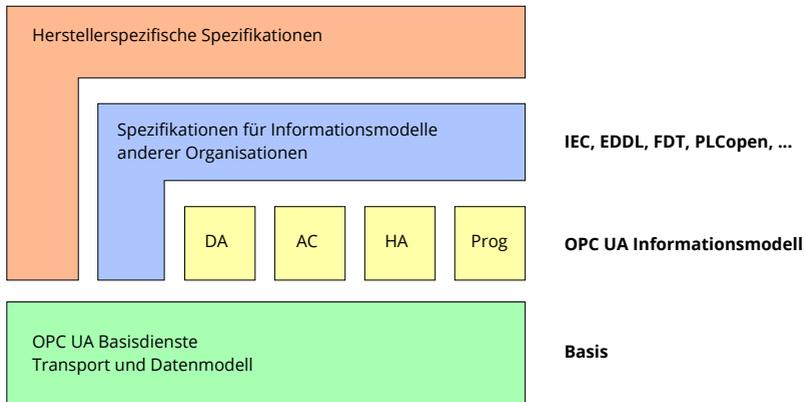


Abbildung 2.8: Architektur von OPC UA in Anlehnung an Mahnke, Leitner und Damm (2009).

DA: Data Access, AC: Alarms & Conditions, HA: Historical Access, Prog: Programs.

binäres mit optimierter Performance und Interoperabilität und ein SOAP-basierter Webservice. Auf dieser Basis stellt OPC UA verschiedene Dienste zur Verfügung für den Datenzugriff oder auch die Ausführung von Programmen und deren Monitoring. Weiterhin sieht die Architektur die Erweiterung des Basisdatenmodells durch domänenspezifische weitere Modelle vor, die in den sog. „Companion Specifications“ beschrieben und typischerweise von anderen Organisationen entwickelt werden (siehe auch Abbildung 2.8). Ihr Gültigkeitsbereich ist ebenfalls herstellerübergreifend, aber zusätzlich lässt OPC UA auch herstellereigene Erweiterungen zu (s. a. Pauker, Frühwirth u. a. 2016).

Das Informationsmodell ist kein hierarchisches, sondern ähnelt Datenmodellen aus der objektorientierten Programmierung. Es besteht aus Knoten („Nodes“, vergleichbar den Objekten), die Attribute haben und aufrufbare Methoden mit Rückgabewerten definieren können. Untereinander können die Knoten in unterschiedlicher Weise miteinander verbunden sein und ein Netz bilden. Insbesondere die Möglichkeit, auch Metadaten und Diagno-

sedaten über die Knoten zur Verfügung zu stellen, zeichnet OPC UA aus. (Mahnke, Leitner und Damm 2009)

Die meisten OPC UA Anwendungen basieren auf dem Client-Server-Modell. Eine Anwendung, die Informationen für andere Systeme zur Verfügung stellt, ist ein UA Server, eine Anwendung, die diese abrufen ("konsumieren") kann, ist ein UA Client. In vielen Fällen stellt eine Anwendung beide Rollen zur Verfügung, ist also gleichzeitig ein UA Server und ein UA Client (Mahnke, Leitner und Damm 2009). Dies könnte beispielsweise ein Roboter sein, der einerseits Statusinformationen und Messwerte zur Verfügung stellt (als UA Server), und andererseits als UA Client Steuerparameter bei einem anderen UA Server abrufen. Alternativ stellt OPC UA auch einen Publish-Subscribe-Ansatz zur Verfügung, der besonders für Embedded Systems und Cloud-basierte Lösungen in Frage kommt. Dabei besteht zwischen den kommunizierenden Systemen keine dauerhafte Verbindung, sondern der Publisher kann verbindungslos senden, Subscriber diese Daten empfangen und weiterverarbeiten.

Die in diesem Unterabschnitt vorgestellte Architektur (OPC UA) und die in Unterabschnitt 2.4.1 beschriebene AutomationML stehen aber keineswegs ohne Berührungspunkte nebeneinander, sondern lassen sich auch erfolgreich gemeinsam nutzen. Ziel dieser Kombination kann eine Verringerung des Aufwands zur Inbetriebnahme im Sinne von „Plug and work“ sein.

„**Plug and work**“ ist die Forderung, die Interoperation zwischen zwei oder mehr Beteiligten mit minimalem Arbeitsaufwand herzustellen, zu ändern oder aufzulösen.

(Schleipen 2018, S. 159ff)

Dabei dient AutomationML der Beschreibung der Anlagen, OPC UA der Kommunikation. Schleipen (2018) beschreibt bildlich: „AutomationML ist das Werkzeug, das vom Handwerker OPC UA eingesetzt wird, um etwas zu

erreichen.“ Auch existiert schon eine spezielle OPC UA Companion Specification zur Integration von AutomationML.

2.4.3 Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0

Das RAMI 4.0 ist ein gemeinsam von mehreren Industrieverbänden entwickeltes dreidimensionales Modell zur Erfassung eines Produkts über den gesamten Lebenszyklus mit dem Ziel einer durchgängigen Erfassung und Abbildung auf IT-Ebene. Auf Basis einer serviceorientierten Architektur bietet es einen Orientierungsrahmen, in dem komplexe Prozesse eindeutig eingeordnet und auch in überschaubarere Pakete unterteilt werden können. Ein weiteres Ziel des RAMI 4.0 ist die Herstellung einer einheitlichen Begrifflichkeit für die interdisziplinäre Zusammenarbeit an Themen im Industrie 4.0 Umfeld.

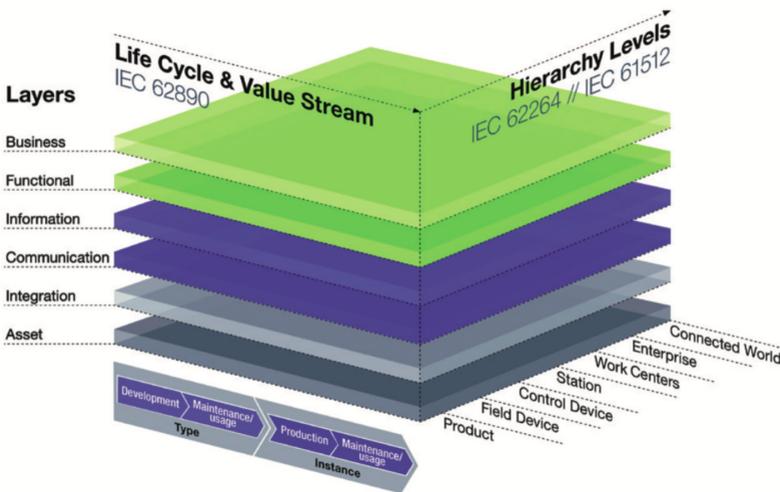


Abbildung 2.9: Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0. Quelle: Plattform Industrie 4.0³

³ <https://www.plattform-i40.de>

Die erste seiner drei Achsen („Hierarchy Levels“, in Abbildung 2.9 von der Mitte nach rechts weisend) ersetzt in gewissem Sinne die überwiegend durch die Hardware vorgegebenen hierarchischen Strukturen der klassischen Automatisierungspyramide, an deren Stelle eine Art Peer-to-Peer-Netzwerk tritt, innerhalb dessen ohne Hierarchie-Ebenen kommuniziert wird. Die zweite Achse (von unten nach oben) bildet die verschiedenen Schichten von der realen physischen Welt über die Integration in digitale Ökosysteme über verschiedene Kommunikationsschichten bis zur Geschäftsprozesslogik ab. Die dritte Achse (links) steht für den Produktlebenszyklus von der Entwicklung bis zu Gebrauch und Wartung, wobei die erste Hälfte („Type“) sich auf die digitale Produktentstehung bezieht, die zweite Hälfte („Instance“) die Produktion realer Instanzen dieses Typs beschreibt. (Heidel 2017)

Ergänzt wird das RAMI 4.0 durch die Industrie-4.0-Komponente, einem Modell zur Kapselung von realen Objekten („Assets“) mit einer digitalen Zwischenschicht („Verwaltungsschale“) mit dem Ziel, diese Objekte in der digitalen Welt verfügbar zu machen.

Die in der vorliegenden Arbeit untersuchten Gebiete sind innerhalb des RAMI 4.0 hauptsächlich auf den Ebenen Communication, Information und Functional zu finden, beziehen sich unter dem Aspekt des Produktlebenszyklus’ vorwiegend auf die Bereiche Development und Production und im Sinne der Hierarchie auf die Ebenen Control Device und Station.

2.5 Zusammenfassung

Die Chancen der unter dem Begriff „Industrie 4.0“ zusammengefassten Aktivitäten und Entwicklungen basieren auf der Möglichkeit der informationellen Vernetzung aller beteiligten Objekte, dem Industrial Internet of Things. Diese Chancen zu nutzen setzt ein neues Informationsmanagement voraus,

in dem bisherige Paradigmen keine oder nur noch begrenzte Gültigkeit haben. An die Stelle der Automatisierungspyramide treten neue Strukturen, die Grenze zwischen Business IT und Production IT verschwimmt. Cyberphysische Systeme bilden die Verbindung zwischen der virtuellen und der realen Welt, sie setzen die Idee in ein materielles Produkt um und liefern ihrerseits wieder zahlreiche Daten zurück, aus deren Analyse neue Schlussfolgerungen für die Produktion möglich werden. Dem Menschen kommt in dieser neuen Form der industriellen Montage einerseits die Rolle des Planers und Problemlösers zu, andererseits kann er auch im Rahmen der kollaborativen Montage als Werker besondere menschliche Fähigkeiten mit denen von Robotern kombinieren. Je nach Art und Grad der Zusammenarbeit reicht das Spektrum der Kollaboration von Roboter und Mensch dabei von der seit langem angewandten Trennung durch Schutzeinrichtungen bis zur unmittelbaren gemeinsamen Aktion in einem ebenfalls gemeinsamen Arbeitsraum. Die entstehende Flexibilität der Montageeinheiten gibt Herstellern die Möglichkeit einer kundenindividuellen Produktion mit einer Kostenstruktur, die der Serienproduktion nahe kommt. Ermöglicht wird all dies erst durch die Etablierung umfangreicher Informationsflüsse im Engineering, in der Anlagensteuerung und zur Geschäftsebene hin. Mit AutomationML steht ein relativ neuer Standard zur flexiblen semantischen Beschreibung von Assets zur Verfügung, der in Kombination mit OPC UA als Architektur für die Kommunikation insbesondere aufgrund der Möglichkeiten zur semantischen Beschreibung ein hohes Potenzial entfaltet. Das RAMI 4.0 bietet die notwendige theoretische Orientierung zur Einordnung von Werkzeugen, Protokollen und Architekturen.

3 Stand der Wissenschaft und Technik

Die Anforderungen an ein kollaborationsgerechtes Wissens- und Prozessmanagement sind vielfältig und kommen aus mehreren thematischen Teilbereichen. Neben den grundsätzlichen Eigenschaften der Anlage selbst und ihren Kommunikationsfähigkeiten spielen auch die optimale Ableitung von Arbeitsplänen, die Berücksichtigung mehrerer Standards, die virtuelle Absicherung und Simulation, aber auch die Persistierung und Analyse anfallender Daten eine Rolle. Den aktuellen Stand der Forschung auf diesen Gebieten fasst der folgende Abschnitt zusammen, den Stand der praktischen Anwendung in der Industrie der daran anschließende.

3.1 Stand der Forschung

Die Fortschritte in der Roboter-Technologie haben dazu geführt, dass trotz hoher Sicherheitsanforderungen die Kollaboration und Kooperation von Worker und Roboter möglich geworden ist. Durch die Entwicklung von Leichtbaurobotern, die häufig als Cobots eingesetzt werden, ist die früher erforderliche räumliche Trennung zwischen Mensch und Roboter nicht mehr grundsätzlich erforderlich. Eine der zahlreichen Herausforderungen auf dem Gebiet der kollaborativen Montage ist die informationstechnische Abbildung

der Produktionsumgebung (Werker, Cobot, weitere Werkzeuge, etc.) zur Unterstützung der Montage. Dabei müssen alle beteiligten Komponenten miteinander kommunizieren können, so dass sowohl für den Roboter als auch für den Menschen verständliche Sprachkonzepte zur Verfügung stehen (Sadik und Urban 2017).

Neben der Sicherheit des Werkers, der Erkennung seiner Aktivitäten und der Integration der Zelle in den Betrieb identifizieren Sadik und Urban (2017) insbesondere die folgenden Forschungsaufgaben und Herausforderungen:

Kooperative Aufgabenplanung

Welche Aufgabe übernimmt der Cobot, welche der Werker, welche wird gemeinsam (echt kollaborativ) erledigt? Ein gängiger Ansatz ist die statische Planung basierend auf den jeweiligen Kompetenzen und der zu erwartenden Auslastung. Dazu werden die Fähigkeiten des Cobots und des Werkers systematisch beschrieben, ebenso auch die bei der Montage auszuführenden Aufgaben. Einen einfachen Ansatz des paarweisen Vergleichs für jede Aufgabe beschreiben Müller, Vette und Mailahn (2016). Durch Beobachtung der Effizienz bei der Ausführung, insbesondere des Werkers, und Rückkopplung in die automatisierte Planung und die CAD-basierte Simulation des gemeinsamen Arbeitsplans kann die Zusammenarbeit weiter optimiert werden (Sadik und Urban 2017).

Darstellung fertigungsbezogener Informationen

Die Gesamtheit der relevanten Objekte einschließlich des Werkers in einer kollaborativen Umgebung mit geeigneten Metadaten zu beschreiben sehen Sadik und Urban (2017) als notwendige Voraussetzung. Diese ist dann auch Grundlage der oben beschriebenen Aufgabenplanung.

Zugang zu fertigungsbezogenen Informationen

Eine weitere zentrale Frage ist diejenige nach dem geeigneten Kommunikationsmittel, um alle relevanten Informationen (z. B. Arbeitsanweisungen) sowohl an den Roboter als auch den Werker übermitteln zu können.

Logik zur Verarbeitung fertigungsbezogener Informationen

Zur Verarbeitung der fertigungsbezogenen Daten bedarf es einer geeigneten Logik, mit deren Hilfe sich jede Komponente an neue veränderte Anforderungen in der Produktion anpassen kann. Dabei muss jeder Teil der Anlage in der Lage sein, die Anforderungen und den gesamten Status der Anlage zu erkennen und seine jeweilige Funktion zu erfüllen (Sadik und Urban 2017).

Thoben, Wiesner und Wuest (2017) leiten aus drei Anwendungsbeispielen für Industrie 4.0 Forschungsbedarf auf verschiedenen Gebieten, insbesondere unter technischen, methodischen und die Geschäftsmodelle betreffenden Aspekten ab. Globalisierte Lieferketten bestehen aus einer Vielzahl von Partnern mit heterogenen IT-Lösungen, deren für Industrie 4.0 erforderliche Interoperabilität eine der Kernfragen aktueller und zukünftiger Forschung ist. Die Integration aller beteiligten Objekte in das „Smart Manufacturing“ und die entsprechenden Netzwerke, Lieferketten und Produktionslinien kann nach Thoben, Wiesner und Wuest (2017) nur mit Hilfe allgemein akzeptierter Standards gelingen. Ein weiteres Forschungsgebiet bildet die Analyse der an zahlreichen Sensoren entstehenden großen Datenmengen („Big Data“), insbesondere die algorithmische und grafische Aufbereitung dieser Daten zur Unterstützung von Entscheidungen des Menschen. Ein Beispiel ist die zuverlässige Bilderkennung im Umfeld von Cobots zur Erkennung und Vorhersage von Bewegungen, die letztlich der Errichtung eines offenen und sicheren Arbeitsraums als notwendiger Grundlage der Kooperation dient. Weitere Themen zukünftiger Forschung auf dem technologischen Gebiet wären die

Sicherheit der Datenflüsse, die Datenqualität und die Qualität der verwendeten Komponenten wie Sensoren und Aktoren. Als aktuelle Forschungsfragen auf dem Gebiet der Methoden werden die Entwicklung und Weiterentwicklung von Referenzmodellen wie dem RAMI 4.0 genannt, insbesondere für die Beschreibung der Fähigkeiten eines Produktionssystems und deren Verwendung im Engineering und der Produktionsplanung. Auch auf dem Gebiet der Visualisierung verschiedenster Daten sehen Thoben, Wiesner und Wuest (2017) eine der aktuellen Herausforderungen, vor allem mit dem Ziel an der Schnittstelle zum Menschen diesem adäquate Entscheidungsgrundlagen zu liefern, nicht nur im Engineering.

3.1.1 Cyber-Physische Systeme und kollaborative Robotik

Einen Überblick über die aktuelle Forschung auf dem Gebiet der Mensch-Roboter-Kollaboration und dazu gehörige Klassifikationen und Begriffsdefinitionen geben X. V. Wang u. a. 2017. Angetrieben sei die aktuelle Entwicklung von dem Wunsch nach einer sinnvollen Kombination der Fähigkeiten von Mensch und Maschine auf der einen und dem Ziel der flexiblen Produktion und Wandelbarkeit der Anlagen auf der anderen Seite. Dabei sollen Routineaufgaben oder spezielle einzelne Schritte eher automatisiert werden, wohingegen lokale Entscheidungen oder Ausnahmesituationen nach menschlichen Fähigkeiten („human touch“) verlangen, um die gegebene Komplexität bewältigen zu können. Die Kombination von menschlichen und maschinellen Fähigkeiten, bei der weder Mensch und Roboter physisch voneinander getrennt sind noch Werker sich quasi als Teil der Automatisierung unterordnen müssen, verlangt auf dem Weg zu einer eher „symbiotischen Mensch-Roboter-Kollaboration“ nach einem höheren Maß an rechnergestützter Intelligenz (X. V. Wang u. a. 2017). Durch die stark gestiegene (potenzielle) Konnektivität aller Komponenten durch zahlreiche neue Kommunikations-

systeme wie W-LAN, Bluetooth, NFC, etc. wird ein Nebeneinander von Werker und automatisierten maschinellen Elementen möglich, in dem die jeweiligen Stärken sich ergänzen statt sich zu gegenseitig zu behindern (Monostori u. a. 2016).

Während Roboter ein hohes Maß an Präzision erreichen, große Massen bewegen können und sich hervorragend für häufig wiederkehrende Aufgaben eignen, erreichen sie schnell ihre Grenzen beim Erkennen und im Umgang mit unerwarteten Ereignissen, die nicht ihrer Programmierung entsprechen (X. V. Wang u. a. 2017). Mit solchen Situationen können Menschen im Allgemeinen wesentlich besser umgehen, da sie eine viel detailliertere Wahrnehmung der Umwelt und umfassendere Fähigkeiten haben. Auf der anderen Seite sind Menschen den Beschränkungen durch Irrtümer, Stress oder Müdigkeit ausgesetzt und ihr Einsatz unterliegt strengen Auflagen der Arbeitssicherheit (Arai, Kato und Fujita 2010). Nach Fong, Thorpe und Baur (2003) muss daher das Ziel sein, mit Technologien, die diese Differenzen überbrücken können, den Roboter als einen verlässlichen Kooperationspartner zu nutzen statt nur als möglicherweise gefährliches Werkzeug. Eine Übersicht und Klassifikation der verschiedenen Arten der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter gibt Unterabschnitt 2.2.1 auf Seite 22. Bei Abweichungen vom geplanten Prozessablauf kann der Werker auf verschiedenen Ebenen eingreifen und reagieren, einen Überblick dazu gibt Abbildung 3.1. Von innen nach außen sind verschiedene Ebenen von Abweichungen vom geplanten Prozess dargestellt, die mit zunehmendem Einsatz, aber auch Risiko für den Werker verbunden sind. Sicherheitseinrichtungen sind häufig übergeordnet vorhanden und daher unabhängig von der Mensch-Roboter-Interaktion zu sehen (X. V. Wang u. a. 2017).

Als systematischen Ansatz zur Konstruktion einer Umgebung für die Kollaboration zwischen Mensch und Roboter definieren X. V. Wang u. a. (2017) eine „Serie von Analyse- und Syntheseschritten, beginnend mit einer formalen Beschreibung der Aufgaben, Mittel und Voraussetzungen, auf dem Weg

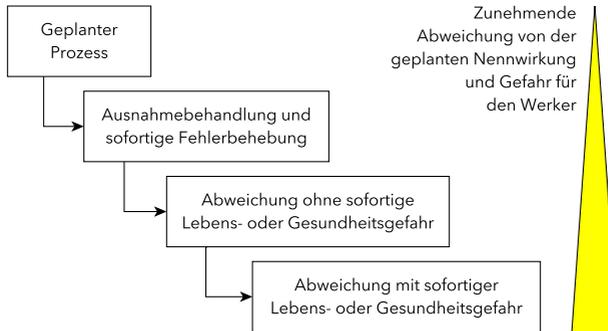


Abbildung 3.1: Der Prozessbeschreibung entsprechende Nennwirkung und ihre schrittweise zunehmende Abweichung von der geplanten Nennwirkung mit den verschiedenen Eingriffsmöglichkeiten des Menschen und deren Risiko. Abbildung in Anlehnung an X. V. Wang u. a. (2017, S. 6).

zu einer annehmbaren teilautomatisierten Lösung mit der Möglichkeit weiterer Iterationen und der Einführung von implizitem Wissen an Stellen der manuellen Intervention in den Bearbeitungsprozess“. Eine besondere Rolle kommt dabei der Entwicklung der Sensoren und Datenverarbeitung zur Wahrnehmung des gemeinsamen Arbeitsraums von Mensch und Roboter zu. So kann zum Beispiel aus Daten von Kameras, die im Bereich des sichtbaren Lichts und im Infrarot-Bereich Daten liefern, über geeignete Kalibrations- und Filtermethoden die Lagebeziehung des Roboters zu Werkzeugen und Werkstücken berechnet werden (Rückert, Adam u. a. 2018).

Einen umfassenden Überblick über die verschiedenen thematischen Teilbereiche der kollaborativen Robotik geben Krüger, Lien und Verl (2009). Neben den auch in Unterabschnitt 2.2.1 auf Seite 22 dargestellten verschiedenen Formen der Zusammenarbeit von Mensch und Roboter und deren Implikationen wurden von Krüger, Lien und Verl (2009) auch die organisatorischen und ökonomischen Aspekte untersucht und dargestellt. In einer Fallstudie konnten sie die typische Verkürzung der gesamten Taktzeiten bei

der Montage durch die kollaborative Montage nachweisen und auch den Bereich aufzeigen, in dem die kollaborative Montage als hybride Arbeitsform zwischen Handarbeit und Vollautomatisierung ihre ökonomische Nische hat. In Abbildung 3.2 werden die Herstellungskosten pro Stück für die manuelle, die vollautomatisierte und die kollaborative Produktion in Abhängigkeit von der pro Jahr produzierten Stückzahl dargestellt. Im mittleren Bereich hat die kollaborative Montage das optimale ökonomische Profil (Krüger, Lien und Verl 2009).

Kosten pro Einheit

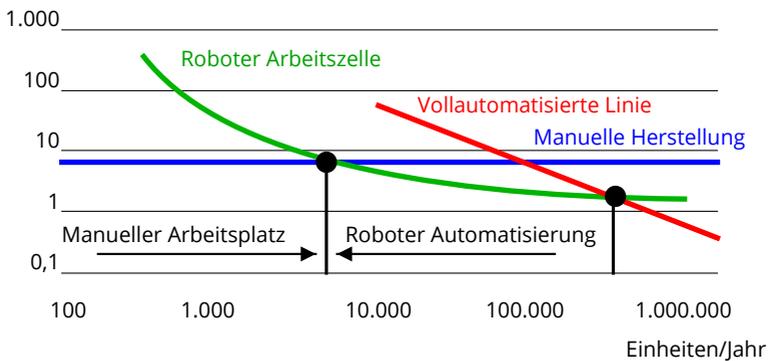


Abbildung 3.2: Arbeits- und Automatisierungskosten in Relation zur hergestellten Stückzahl. Abbildung in Anlehnung an Krüger, Lien und Verl (2009, Abb. 40).

Eine absolute Voraussetzung für die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter ist die Sicherheit des Werkers. Es existieren zahlreiche Ansätze und Forschungsarbeiten zu diesem Thema, an dem auch zahlreiche Institutionen (z. B. Berufsgenossenschaften) ein hohes Interesse haben. Die Wege zur Herstellung der Sicherheit umfassen zahlreiche Maßnahmen von der mechanischen Gestaltung des Roboters und Greifers bis zur Verwendung verschiedenster Sensoren zur Überwachung des gemeinsamen Arbeitsraums oder Kollisionserkennung. Die Forschung konzentriert sich aktuell ausschließlich auf die Zusammenarbeit *eines* Menschen mit einem Roboter. Krüger, Lien

und Verl (2009) sehen eine der zahlreichen zukünftigen Herausforderungen auf diesem Gebiet darin die Zusammenarbeit *mehrerer* Menschen mit einer gemeinsamen Aufgabe durch einen Roboter zu unterstützen.

Die in Leitão u. a. (2016) vorgeschlagene und im PERFoRM-Projekt angewandte Architektur zielt darauf ab, Systeme möglichst einfach zu rekonfigurieren, indem der Plug-and-Produce-Ansatz mit den Eigenschaften des menschlichen Werkers kombiniert wird. Weiterhin sind Werkzeuge zur Planung, Simulation und zur Entscheidungsunterstützung enthalten. Eine zentrale Rolle in der von Leitão u. a. (2016) präsentierten Systemarchitektur spielt eine Middleware, die die verschiedenen Systeme (MES, SCADA, etc.) und Assets (Roboter, SPS, etc.) durchgängig sicher, transparent und zuverlässig miteinander verbindet (siehe auch Abbildung 3.3). Dabei stellen die einzelnen Komponenten ihre Funktionalitäten als Services zur Verfügung, die von anderen Komponenten erkannt und genutzt werden können.

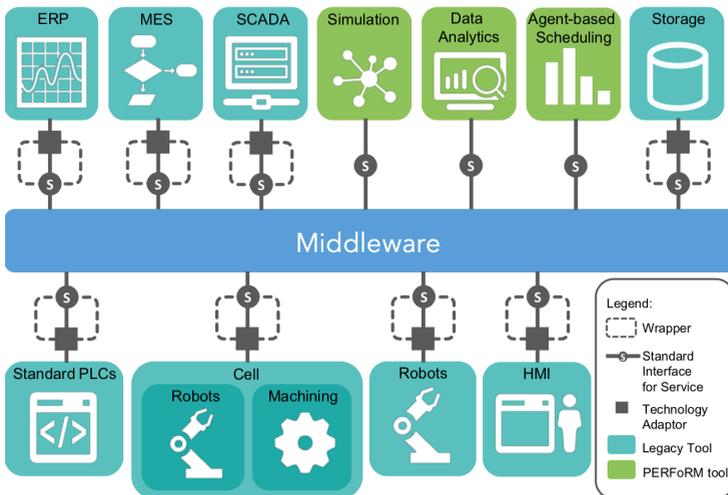


Abbildung 3.3: PERFoRM Systemarchitektur. Quelle: Leitão u. a. (2016, S. 5732, Abb. 2).

Zu den wichtigsten Aufgaben der Middleware gehören demnach neben der Unterstützung dieser Services auch die Sicherung der Performance, die Überwachung des Datenaustauschs, die Umwandlung von Daten, die Sicherheit, die Ausnahmebehandlung und die Persistenz der Daten. Verschiedene Adapter ermöglichen die Integration älterer Komponenten durch entsprechende Schnittstellen (Leitão u. a. 2016, S. 5733).

3.1.2 Kollaborationsgerechtes Informationsmanagement

Bisher gibt es erst sehr wenige Arbeiten, die sich mit dem Informationsmanagement bei der kollaborativen Montage beschäftigen und noch keine, die die Konsolidierung der Daten zum Ziel haben. Jedoch existieren grundlegende Arbeiten zum Design kollaborativer Prozesse (Saenz u. a. 2018).

Einen Ontologie-basierten Ansatz zum Informationsmanagement bei der kollaborativen Montage schlagen Sadik und Urban (2017) vor. Dieser besteht aus einem Multi-Agenten-System, implementiert mit dem Java Agent Development Environment (JADE), das mehrere selbständige Agenten verwaltet, die proaktiv, responsiv und sozial interagieren und aufgrund der ihnen zur Verfügung stehenden Informationen zum Beispiel Arbeitspläne generieren. Weiterhin gehört ein regelbasiertes System dazu, das neben den produktionsbezogenen Regeln auch den Aufbau und weitere Informationen der Anlage beinhaltet (Sadik und Urban 2017).

Einen grundsätzlichen Konflikt sehen Böckenkamp u. a. (2017) zwischen der hierarchischen deterministischen Planung auf der einen und der maximalen Autonomie selbstorganisierender Systemkomponenten auf der anderen Seite. Letztere führt zu einer höheren Flexibilität und Anpassungsfähigkeit der gesamten Anlage. Auch wenn die einzelne Komponente sich, allein schon aus Sicherheitsgründen, weiterhin deterministisch verhält, kann sich doch bei der Kooperation dieser Komponenten oder sogar einem Agieren als Schwarm ein

nicht-deterministisches Verhalten ergeben. Das bei hoher Autonomie bestehende Risiko erheblicher Wartezeiten einzelner Komponenten ließe sich durch möglichst umfangreiche Fähigkeiten verringern. Ein anderer Ansatz zur zumindest teilweisen Auflösung dieses Konflikts könne auch eine nur lokal und in zeitlich engen Fenstern bestehende Vorplanung der Ausführung sein (Böckenkamp u. a. 2017).

Einen Cobot, der fast schon als humanoider Assistent anzusehen ist, stellen El Makrini u. a. (2017) auf der Basis eines Baxter Robots mit zwei Armen und einem Touchscreen vor. In einem exemplarischen kollaborativen Workflow ist er in der Lage, den durch Winken des Werkers signalisierten Beginn der Zusammenarbeit wahrzunehmen (Gestenerkennung). Anschließend ordnet er durch Gesichtserkennung dem Benutzer seinen Namen zu und spricht diesen über das Display mit Namen an. Mit einer Kamera und einer entsprechenden Bilderkennung assistiert er dann bei der Inspektion und korrekten Montage eines Werkstücks. Diese Schritte erlauben einen intuitiven Umgang mit dem Cobot und es sind zahlreiche weitere Anwendungen dieses Ansatzes in der Zukunft denkbar.

Eine Methodik zur Einführung und Implementierung von Intelligent Manufacturing Systems (IMS), besonders in kleinen und mittleren Unternehmen, stellen Cencen, Verlinden und Geraedts (2018) vor. Ein definierter Satz an Schritten von der Analyse bis zur Evaluation soll die Rekonfiguration kollaborativer Systeme einerseits auf einen systematischen Ansatz bringen und andererseits vor allem eine schnelle Anpassung der Produktionssysteme an neue Produkte oder Produktvarianten erlauben. Bisher wurde der Ansatz noch nicht vollständig implementiert. Einen ähnlichen Ansatz zur systematischen Einführung von Cobots beschreiben Malik und Bilberg (2017). X. V. Wang u. a. (2017) stellen einen Rahmen zur Klassifizierung verschiedener Formen der Kollaboration, insbesondere auch unter Berücksichtigung mehrerer Menschen oder Roboter vor.

Durch die zunehmende Verbreitung cyber-physischer Systeme im Industrie-4.0-Kontext wird die Automatisierungspyramide immer flacher und durch ein heterogenes Netzwerk miteinander kommunizierender Entitäten abgelöst (Ciavotta u. a. 2017). Eine IoT-Middleware zur Unterstützung der Simulation („Digitaler Zwilling“), insbesondere für kleinere Fabriken, stellen Ciavotta u. a. (2017) auf Basis von Microservices mit ihrem MAYA System vor. Ältere Systeme können hier mit Hilfe einer Verwaltungsschale angebunden werden (Adolphs u. a. 2016).

Eine auf Apache Camel basierende und im Rahmen des PERFoRM Projekts entwickelte Middleware-Lösung für industrielle Komponenten, die jedoch nicht gezielt kollaborative Fälle anspricht, wurde von Gosewehr u. a. (2018) entwickelt. Das verwendete Informationsmodell basiert auf AutomationML und die OPC-UA-Anbindung erfolgt mit Hilfe von Eclipse Milo (siehe auch Abbildung 3.3). Einen ähnlichen Ansatz verfolgen Schel u. a. (2017) mit einem Manufacturing Service Bus (MSB), der die Anbindung von Komponenten über zahlreiche Schnittstellen und Protokolle wie REST, OPC UA oder MQTT erlaubt.

Einen Ansatz zur Entwicklung eines Human Machine Interface mit mobilen Endgeräten und auf Basis von OPC UA zeigen Gutierrez-Guerrero und Holgado-Terriza 2015 auf.

In der Fallstudie von Pauker, Ayatollahi und Kittl (2014) wird für einen speziellen Robotertyp ein OPC-UA-Server und das entsprechende Informationsmodell aufgebaut, um den Roboter anzusteuern. Die Kontrolle des Roboters kann von einem OPC-UA-Client aus erfolgen, der OPC-UA-Server wiederum steuert über die proprietäre Herstellerschnittstelle dann den Roboter (siehe auch Abbildung 3.4). Die Überwachung des Roboterzustands übernimmt der OPC-UA-Server und stellt so unter anderem sicher, dass kein Roboterprogramm gestartet werden kann, während der Roboter bereits eines

ausführt. Zusätzlich wird auf der Seite des Informationsmodells einem besonderen Aspekt Rechnung getragen, nämlich der Wandelbarkeit der Zelle. Wechselt der Roboter den Greifer, wird dynamisch der entsprechende Teil des Informationsmodells geändert und die Eigenschaften und Methoden des neuen Greifers werden über OPC UA zugänglich (Pauker, Ayatollahi und Kittl 2014).

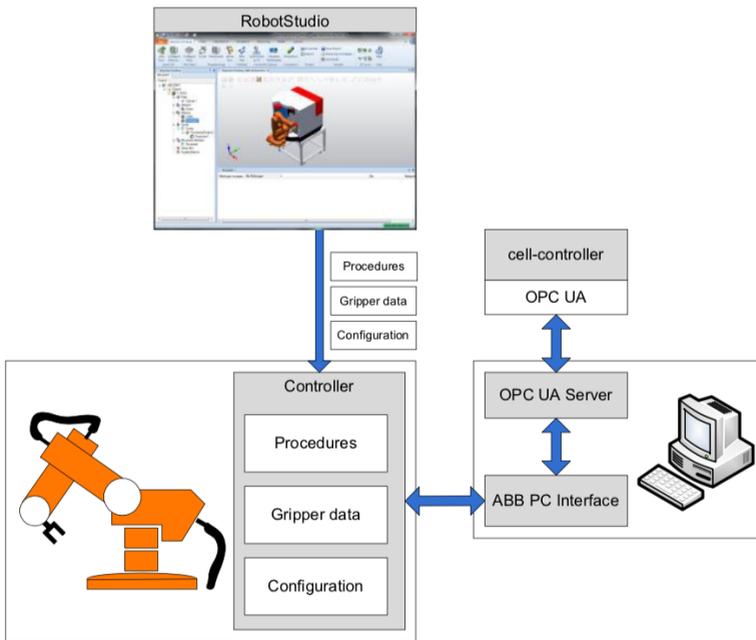


Abbildung 3.4: Systemarchitektur mit OPC-UA-Server für ABB Roboter. Quelle: Pauker, Ayatollahi und Kittl (2014, S. 81, Abb. 5).

3.1.3 Fähigkeitsbasierte Produktionsplanung

Fähigkeiten sind ein relativ neuer Ansatz zur Modellierung von Produktionssystemen. Zur Herstellung eines Produkts sind einerseits bestimmte Fä-

higkeiten erforderlich und die zur Verfügung stehenden Ressourcen haben andererseits bestimmte Fähigkeiten. Eine Produktionsplanung, die darauf basiert diese beiden Mengen in mehr oder weniger deterministischer Art und Weise zusammenzubringen, nennt man fähigkeitsbasierte Produktionsplanung. Einen Ansatz zur Trennung der beteiligten Entitäten bietet das PPR-Modell, das zwischen Produkt, Prozess und Ressource unterscheidet (Cutting-Decelle u. a. 2007; Pfrommer, Schleipen und Beyerer 2013; Schleipen u. a. 2014):

Produkt

Ein Produkt kann ein Zwischenprodukt oder ein Endprodukt sein und es ist zu unterscheiden zwischen dem (abstrakten) Produkt-Typ und der konkreten Realisation eines einzelnen Exemplars des Typs.

Prozess

Ein Prozess beschreibt Änderungen an einem Produkt während der Produktion und umfasst verschiedenste Verfahren wie zum Beispiel Herstellung, Transport oder Montage. Aus der Menge aller Prozesse und ihrer möglichen Verbindungen ergeben sich mögliche Ausführungsplanungen.

Ressource

Als Ressource wird eine Entität (Hardware oder Software) bezeichnet, die in die Prozessausführung involviert ist, selbst aber nicht Teil des Produkts ist, also zum Beispiel Roboter, Maschinen oder Werkzeuge. Die Ressource und ihre Beziehungen zueinander bilden die Topologie eines Werks.

Da noch keine einheitliche Definition besteht, schlagen Pfrommer, Schleipen und Beyerer (2013) die in Abbildung 3.5 dargestellte Semantik des Begriffs „Fähigkeiten“ („Skills“) auf der Basis des PPR-Konzepts vor. Aus der Menge der Prozesse („Schweißen“) ergibt sich in Verbindung mit den zur Verfügung

stehenden Ressourcen eine konkrete Fähigkeit wie zum Beispiel „Gasschweißen auf Maschine 1“. In Verbindung mit einem konkreten herzustellenden Produkt kann aus den Fähigkeiten eine Folge von Aufgaben („Tasks“) abgeleitet werden, z. B. „Schweißen der Teile 1 und 2 ergibt Teil 3“. Kommen konkrete Produktionsziele hinzu, können daraus Ausführungspläne abgeleitet werden.

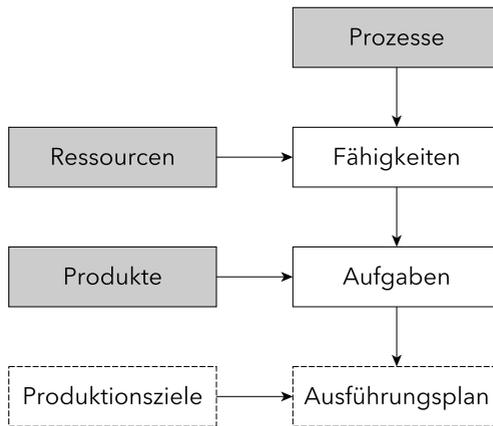


Abbildung 3.5: Fähigkeitsbasierte Produktionsplanung nach dem PPR-Modell. Abbildung in Anlehnung an Pfrommer, Schleipen und Beyerer (2013, Abb. 2).

Daraus ergibt sich nach Pfrommer, Schleipen und Beyerer (2013) folgende Definition:

Eine **Fähigkeit** („Skill“) ist das Vermögen einer Ressource einen Prozess auszuführen. Fähigkeiten sind also die Verknüpfung zwischen Prozessen und Ressourcen, angereichert um zusätzliche Informationen. (s. a. Abb. 3.5)

Nach Haider (2013) ist ein „Asset“ eine Komponente, deren wirtschaftliche Lebensdauer größer als 12 Monate ist und die ihren Nutzen erhält durch die Bereitstellung von Diensten an Benutzer. Da die Begriffe „Skill“ und

„Asset“ keine unmittelbare deutsche Entsprechung vergleichbarer Semantik haben, werden sie im folgenden nicht übersetzt, sondern als Fachbegriffe im englischen Original weiter verwendet. Ein fähigkeitsbasiertes Management der Assets schlagen Aleksandrov, Schubert und Ovtcharova (2014) vor mit dem Ziel einer vertikalen Integration zwischen den Systemen höherer Ebene (wie Enterprise Resource Planning (ERP)) und den Systemen der Ausführungsebene. Der im Rahmen des Projekts SkillPro¹ entwickelte Ansatz ist in Abbildung 3.6 überblicksartig dargestellt.

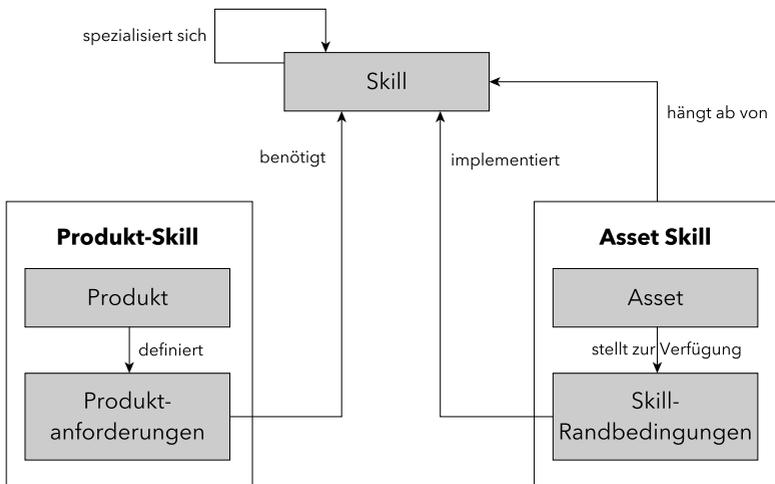


Abbildung 3.6: Fähigkeitsbasierte Produktionsplanung nach dem SkillPro-Ansatz. Abbildung in Anlehnung an Aleksandrov, Schubert und Ovtcharova (2014, Abb. 2, S. 469).

Er greift den Plug-and-Produce-Ansatz auf und erweitert ihn um alle Arten von Assets einschließlich menschlicher Arbeitskraft. Er bezieht neben der Ausführung auch die Schritte der Ausführungsplanung und mittel- und langfristige Aufgaben mit ein. Das Skill-Konzept ist eine logische Erweiterung des oben dargestellten PPR-Konzepts, indem es insbesondere drei verschie-

¹ <http://www.skillpro-project.eu>

dene Arten von Skills und deren Zusammenwirken definiert (Aleksandrov, Schubert und Ovtcharova 2014):

Skill

Ein Skill ist eine abstrakte Darstellung für einen Prozess, der durch Metadaten (Parameter) spezifiziert werden kann. Skills können hierarchisch strukturiert sein und somit Taxonomien aufbauen. Dabei gelten die Prinzipien der Vererbung und speziellere Skills erben die Eigenschaften von weiter oben in der Hierarchie stehenden.

Produktions-Skill

Als Produktions-Skill wird die Zuordnung bestimmter Produktionsanforderungen für ein Produkt aufgrund seiner Eigenschaften bezeichnet. Er erfordert einen mit bestimmten Werten parametrisierten Skill, um die Produktionsanforderungen zu erfüllen.

Asset Skill

Die Fähigkeit eines Assets, einen bestimmten Skill zur Verfügung zu stellen, nennen Aleksandrov, Schubert und Ovtcharova (2014) Asset Skill. Er implementiert einen bestimmten Skill innerhalb der durch den Asset vorgegebenen Beschränkungen bei der Wahl der Parameter. Zusätzlich kann er Beziehungen zu anderen Skills als Vor- oder Nachbedingungen haben.

Auf den Skills, die sequenziell oder parallel ausgeführt werden können, werden verschiedene Operationen wie das „skill matching“ oder die Komposition zu zusammengesetzten Skills definiert. Weiterhin sieht das Skillpro-Framework verschiedene Teilsysteme zum Management der Skills vor, insbesondere das Enterprise Management System (AMS), das Execution Management System (EMS) und die Skill Execution Engine (SEE).

Die Skills werden in diesem Kontext durch das AutomationML-Format beschrieben und kommuniziert, in dem auch die Assets beschrieben sind und ihre Daten und Fähigkeiten über entsprechende OPC UA Objektstrukturen anderen zur Verfügung stellen, so dass sie durch die Verbindung aus physischer Struktur und virtueller Abbildung cyber-physische Systeme bilden (Pfrommer, Stogl u. a. 2014; Schleipen u. a. 2014). Die im Skillpro-Projekt verwendeten Arten von Skills und ihre Beziehungen zueinander fasst Abbildung 3.7 zusammen.

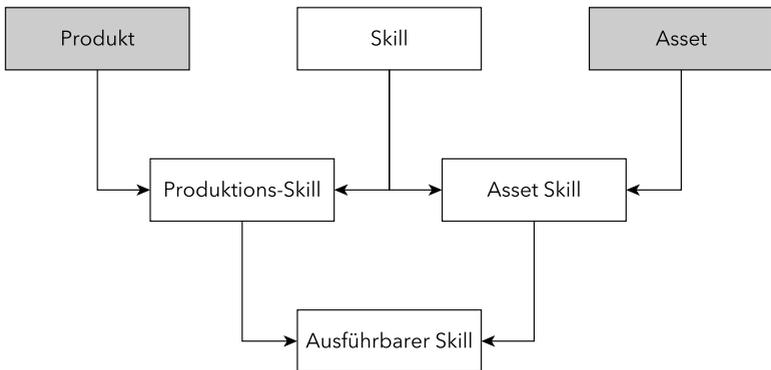


Abbildung 3.7: Im Skillpro-Projekt verwendete Arten von Skills. Abbildung in Anlehnung an Pfrommer, Stogl u. a. (2014, Abb. 1).

Verknüpft werden die so modellierten Assets und Skills durch drei Managementsysteme (siehe auch Abbildung 3.8), die gemeinsam für Planung und Ausführung der Skills sorgen und über OPC UA miteinander kommunizieren (Pfrommer, Stogl u. a. 2014). Das Asset Management System (AMS) bildet die Wissensbasis des Unternehmens in Bezug auf die Produktion und führt Produktions-Skills und Asset Skills zusammen, so dass daraus ausführbare Skills generiert werden können. Diese können dann vom Manufacturing Execution System (MES) koordiniert und zu einem Ausführungsplan zusammengestellt werden, der mehrere Assets beinhalten kann und vom aktuellen

Zustand der Assets abhängt. Dazu steht das MES mit (typischerweise) mehreren Skill Execution Engines in Kontakt, die eine Art Verwaltungsschale um die Assets bilden und ein einheitliches Interface anbieten (Pfrommer, Stogl u. a. 2014) (siehe auch Abbildung 3.8).

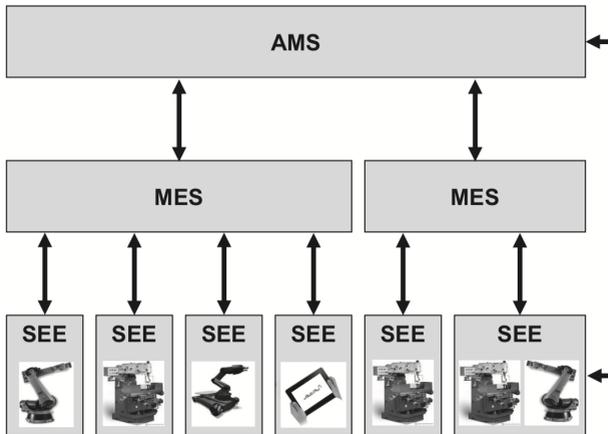


Abbildung 3.8: Skillpro Systemarchitektur. AMS: Asset Management System, MES: Manufacturing Execution System, SEE: Skill Execution Engine. Abbildung aus Pfrommer, Stogl u. a. (2014, Abb. 2).

Einen ebenfalls skill-basierten Ansatz zur Fertigungsplanung in Verbindung mit einem Optimierungsmodell verfolgen Storms u. a. (2017). Drei alternative Ansätze zur Zuordnung zwischen Ressource und Aufgabe stellen Blanke-meyer u. a. (2019) gegenüber.

3.1.4 Anwendung und Kombination von Standards

Aktuelle Standards zur Kommunikation und Datenmodellierung sind nicht nur selbst Gegenstand der Forschung, sondern auch ihre Anwendung für neue Fragestellungen und mögliche Kombinationen. Eine in diesem Kontext

große Rolle spielen AutomationML und OPC UA, deren Grundlagen bereits in Abschnitt 2.4 erläutert wurden. Henßen und Schleipen (2014) beschreiben einen Ansatz zur gemeinsamen Nutzung beider Protokolle durch die Identifikation von Analogien und Ableitung einer Methode zur Generierung eines OPC UA Datenmodells aus einer vorliegenden Anlagenbeschreibung in AutomationML. Dies soll vor allem den am Anfang der Nutzung von OPC UA hohen Aufwand für die Entwicklung des Datenmodells verringern, indem aus den offline vorhandenen Daten ein Kommunikationsmodell abgeleitet wird. Diese liegen im Idealfall geschlossen und umfassend in AutomationML vor, können jedoch im weniger günstigen Fall auch auf mehrere Quellen verteilt sein. Da beide Standards einen objektorientierten Ansatz haben und auf dem Typ-Instanz-Prinzip beruhen, können einige Analogien ausgenutzt und darauf Zuordnungen definiert werden. Aus der hierarchischen Baumstruktur von AutomationML kann eine ebenso hierarchische OPC UA Datenstruktur abgeleitet werden, obwohl dies nur ein Spezialfall der in OPC UA grundsätzlich möglichen Netzstrukturen und damit eine bewusste Einschränkung ist. Die trotz aller Ähnlichkeiten bestehenden Unterschiede zwischen den beiden standardisierten Modellen können durch Definition eigener OPC UA Typen (wie zum Beispiel „HasAMLChild“) überbrückt werden (Henßen und Schleipen 2014). Dazu existiert bereits ein automatischer Konverter von AutomationML zu OPC UA².

Die Produktion einer Vielzahl von Varianten eines Produkts erfordert die häufige Umrüstung und Rekonfiguration von Anlagen, bei der möglichst geringe Aufwände entstehen sollen. Einen wichtigen Beitrag dazu kann das Konzept der Verwaltungsschale liefern, das eine informationstechnische Kapselung jeder Komponente einschließlich einer Abstraktion ihrer Fähigkeiten auf ein herstellerunabhängiges und für andere Komponenten semantisch verarbeitbares Niveau vorsieht (Hankel 2015). Einen Ansatz zu einer solchen „Plug and Produce“-Lösung stellen Profanter u. a. (2017) vor. Demnach besteht

² <https://aml2ua.iosb.fraunhofer.de/>

eine solche Umgebung aus einem OPC UA Discovery Service in Verbindung mit einer hierarchischen Architektur und einem Manufacturing Service Bus (MSB), der neue Komponenten bemerkt und ihre Konfiguration automatisiert erledigt. Die einzelnen Komponenten sind von einer Verwaltungsschale „umgeben“ und die Kommunikation findet auf Basis von OPC UA statt. (siehe auch Abbildung 3.9).

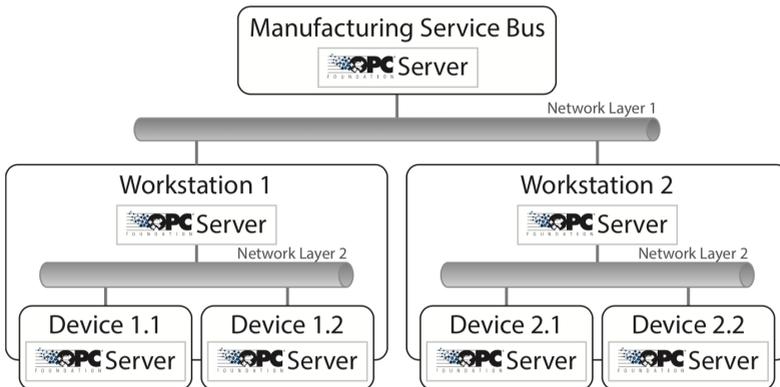


Abbildung 3.9: Plug-and-Produce-Architektur mit Manufacturing Service Bus. Abbildung aus Profanter u. a. (2017, Abb. 2).

Die zentrale Rolle in dieser Architektur spielt der Manufacturing Service Bus, der OPC UA Local Discovery Server mit Multicast Extension (LDS-LE) implementiert und alle Informationen über im Netzwerk vorhandene Assets bereithält und gleichzeitig entsprechend auf neu verbundene reagiert. Damit verwandelt sich die Automatisierungspyramide in eine mehr oder weniger flache horizontal und vertikal integrierte Automationsplattform (Profanter u. a. 2017). OPC UA stellt verschiedene Dienste zur Verfügung, die mehr oder weniger flexibel das Hinzufügen und Verwalten neuer Server erlauben. Bei der Multicast Extension senden neu hinzugefügte Hosts per Multicast eine Ankündigung und werden dann vom Discovery Server registriert, so dass keine festen IP Adressen oder ähnliche Daten vorgegeben werden müssen

(OPC Foundation 2015). Profanter u. a. (2017) verwenden zur Evaluation eine eigene Implementierung des Local Discovery Servers mit Multicast Extension auf Basis des Open Source Eclipse Projekts Milo³ als Framework, das auch in der vorliegenden Arbeit Verwendung findet.

Einen pragmatischen Ansatz zur Kapselung der Robotersteuerung in OPC UA zeigen Brecher u. a. (2017) auf. Dabei werden die Zustände und Fähigkeiten eines Roboters, hier des UR 5 von Universal Robots, auf Socket- bzw. Modbus-Ebene von einem von der eigentlichen Robotersteuerung getrennten Rechner angesprochen, der gleichzeitig als OPC-UA-Server fungiert und aufgrund des entsprechend modellierten Informationsmodells alle Roboterzustandsdaten und -fähigkeiten einem OPC-UA-Client zur Verfügung stellt, so dass eine übergreifende und von der speziellen Implementierung unabhängige Möglichkeit der Ansteuerung des Roboters entsteht.

3.1.5 Virtuelle Absicherung und Simulation der Montage

Zahlreiche Möglichkeiten ergeben sich, wenn sowohl das Produkt als auch die Produktionsanlage modellhaft digital dargestellt werden („Digitaler Zwilling“). Einen Ansatz zur teilweise automatisierten Planung und Robotersteuerung auf Basis von Simulationen zeigen (Roggendorf u. a. 2019) auf. Insbesondere werden hier Greiferpositionen und -zustände und die Bewegungsbahnen des Roboterarms in Verbindung mit Expertenwissen geplant. Eine verbreitete Möglichkeit zur Programmierung von Robotern ist das Bewegen des Roboters zum Lernen der dann später selbständig durchgeführten Bewegungen („Teaching“). Wird dieses Lernen nicht am Roboter selbst vollzogen, sondern innerhalb einer Simulation, die mit Hilfe geeigneter Geräte in die eigentliche Arbeitsumgebung eingeblendet wird („Augmented Reality“), ergeben sich daraus zahlreiche Vorteile, wie Rückert, Meiners und Tracht

³ <https://github.com/eclipse/milo>

(2018) zeigen. Das verwendete System fasst Abbildung 3.10 zusammen. Im Mittelpunkt steht dabei ein Controller, der die erzeugten Daten erfasst, speichert und dem Roboter zur Verfügung stellt und gleichzeitig auch die Schnittstelle für den Werker bildet. Die AR Geräte und die Simulation sind nicht mehr erforderlich, nachdem die Roboterprogramme erzeugt wurden.

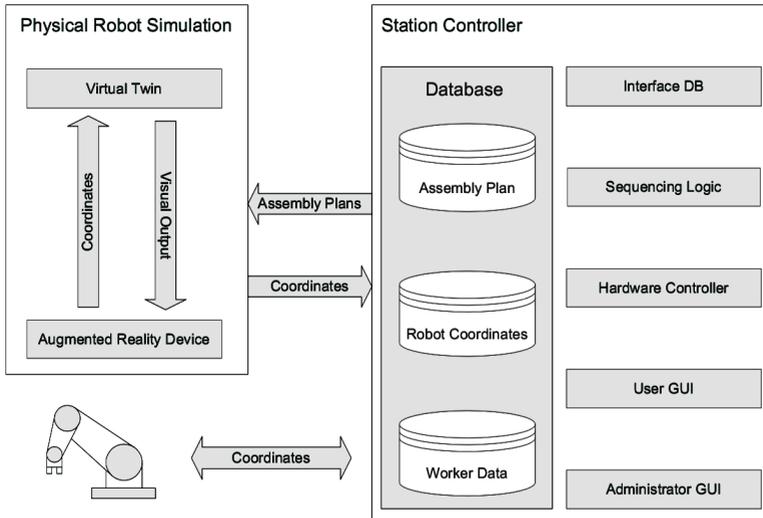


Abbildung 3.10: Systemarchitektur mit Station Controller und physikalischer Roboter-Simulation. Abbildung aus Rückert, Meiners und Tracht (2018, Abb. 2).

Einer solchen virtuellen Absicherung durch Simulation kommt bei kollaborativen Prozessen eine besondere Bedeutung zu, da sie einen wichtigen Beitrag zur Herstellung und Aufrechterhaltung der Sicherheit des Werkers liefern kann. Einen Weg zur Implementierung unter Berücksichtigung der Eignung verschiedener Ein- und Ausgabegeräte skizzieren Rückert, Wohlfrohm und Tracht (2018).

3.1.6 Persistierung und Rückführung von Prozess- und Qualitätsdaten in Planung und Konstruktion

Eine „lebenszyklusorientierte Prozesskettenplanung“ schlagen Labbus u. a. (2017) anhand eines Fallbeispiels aus der Automobilindustrie vor. Mithilfe des Standards zur Anlagenbeschreibung AutomationML wird schon bei der Planung der Einsatz mehrerer Werkzeuge und die einfache Weitergabe der Planungsdaten ermöglicht. Diese können bei der Inbetriebnahme unmittelbar (eventuell teilweise automatisiert mit einem Konverter⁴) in ein OPC-UA-Datenmodell überführt werden, das die Anlagensteuerung und die Erfassung von Zustandsdaten über OPC-UA-Verbindungen ermöglicht. Beim Betrieb werden zusätzlich Anlagendaten in einen Data Lake persistiert, die dann später wieder zu Planungszwecken herangezogen und ausgewertet werden können (siehe Abbildung 3.11).

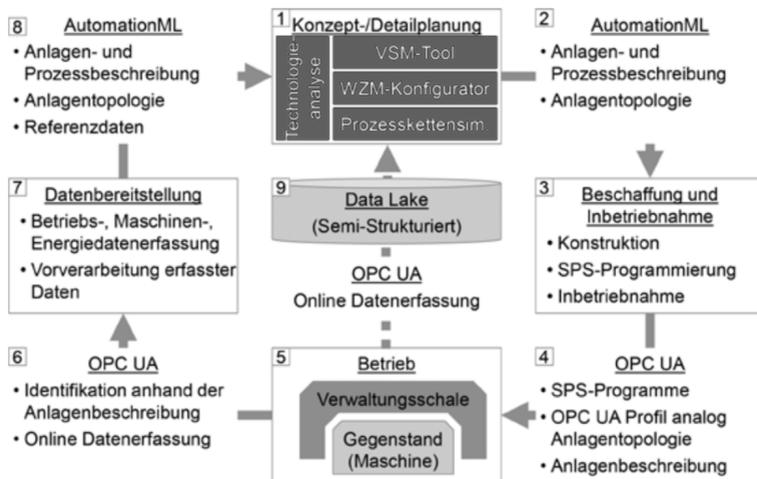


Abbildung 3.11: Integriertes Gesamtkonzept zur Datenbereitstellung. Abbildung aus Labbus u. a. (2017, Abb. 3, S. 542).

⁴ <https://aml2ua.iosb.fraunhofer.de/>

3.2 Stand der Technik in der Industrie

Die im vorherigen Kapitel dargestellten Forschungsarbeiten und -ergebnisse sind in den meisten Fällen bisher nur in prototypische Implementierungen eingeflossen, von einer weiten Verbreitung dieser Ansätze in der Industrie kann keine Rede sein. Die Studie von Bauer, Bender u. a. (2016) mit dem Untertitel „Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen“ kommt u.a. zu den folgenden Ergebnissen:

- Es gibt bisher kaum kollaborative Anwendungsfälle in laufender Produktion.
- Überwiegend arbeiten Werker und Roboter in Koexistenz (vgl. Kapitel 2.2.1) nebeneinander.
- Neben dem Hauptziel, der wirtschaftlichen Optimierung, werden Roboter auch zur Verbesserung der Ergonomie eingesetzt.
- Der Aufwand zur Aufrechterhaltung der Sicherheit wird offenbar systematisch unterschätzt.

Auch in den drei mittelgroßen Anwenderunternehmen aus der Industrie, die im Rahmen des KoKoMo-Projekts prototypisch einen kollaborativen Montage-Arbeitsplatz umgesetzt haben, waren diese die ersten derartigen Arbeitsplätze im Unternehmen.

Die von Kadir, Broberg und Conceição (2018) unter diesem Aspekt untersuchten Unternehmen hatten vor der Studie wenig oder keine Erfahrungen mit kollaborativer Robotik. In Interviews mit verschiedenen Akteuren zu zentralen Themen des Einsatzes von Cobots zeigt sich, dass die Inbetriebnahme mit nur mäßigem Aufwand verbunden war, die Werker sich sicher fühlten und ihnen sich wiederholende Arbeitsabläufe abgenommen werden

konnten, aber der richtige Einsatz, auch unter ökonomischen Aspekten, die entscheidende Herausforderung zu sein scheint.

Auch die durchgängige Nutzung aller zur Verfügung stehenden Daten als Grundlage einer modernen Anlagenplanung und -nutzung ist in der Industrie keinesfalls Standard. Trost (2015) cit. in Schleipen (2018, S. 56) zeigt sogar erheblichen Nachholbedarf, denn etwa 40 % der befragten Unternehmen berichteten von einer nur unzureichenden Datenqualität und in 60 % der Betriebe sind die Verantwortlichen mit den Kennzahlen unzufrieden, fast die Hälfte hat im Unternehmen schlichtweg keine. 20–30 % der geplanten Produktionsprozesse werden kurz vor Beginn noch geändert wegen Maschinenfehlfunktionen oder unvorhersehbaren Konflikten (Schleipen 2018, S. 56). Diese Prozesse wurden also offensichtlich auch nicht simuliert.

Eine im Jahr 2018 durchgeführte Umfrage zum Stand der Umsetzung von IIoT-Projekten in der deutschen Industrie (IDC Central Europe 2018) ergab, dass in der Fertigungsindustrie 23 % aller Unternehmen bereits entsprechende Projekte umgesetzt haben, im Maschinen- und Anlagenbau sogar 26 %, in der öffentlichen Verwaltung waren es nur 7 %. Als Hindernisse bei der Umsetzung wurden von den Unternehmen unter anderem genannt die hohe Komplexität, der Mangel an Softwaresicherheit und eine ungeeignete Infrastruktur. Von 15 % der befragten Unternehmen wurden auch Unklarheiten über den Kundennutzen als entgegenstehende Bedingung genannt. Rund ein Drittel der Unternehmen will bis Ende 2018 ein IIoT-Lab, also eine geschützte Umgebung zum Testen von IIoT-Projekten und -Prototypen, einrichten. Auch hier sind die Fertigungsunternehmen und die Maschinen- und Anlagenbauer deutlich weiter vorne als die übrigen Branchen. Chance und Risiko gleichzeitig sehen die Analysten von IDC (IDC Central Europe 2018) bei den noch fehlenden einheitlichen Standards zur Integration.

Bei einem genaueren Blick auf die Form der Mensch-Roboter-Kollaboration in 25 Anwendungsfällen aus der Industrie, die das Fraunhofer Institut für

Arbeitswirtschaft und Organisation im Jahr 2016 näher untersucht hat, fällt auf, dass die echte Kollaboration offenbar recht selten vertreten ist (siehe Abbildung 3.12). Die Definition und nähere Erläuterung der einzelnen Interaktionsformen ist in Unterabschnitt 2.2.1 auf Seite 22 zu finden.

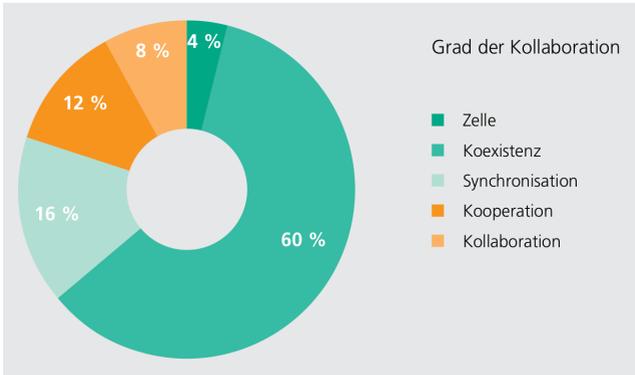


Abbildung 3.12: Grade der Kollaboration in 25 Anwendungsfällen aus der Industrie. Abbildung aus Bauer, Bender u. a. (2016, Abb. 19, S. 39).

Mit einem Anteil von 60 % an den untersuchten Anwendungsfällen dominiert die Koexistenz, das heißt es gibt keinen gemeinsamen Arbeitsraum von Mensch und Roboter, aber im Gegensatz zur Zelle gibt es keinen Schutzzaun. Die zweithäufigste Art der Zusammenarbeit ist die synchronisierte mit 16 %, bei der Mensch und Roboter zwar einen gemeinsamen Arbeitsraum haben, sich in diesem aber nicht zur selben Zeit bewegen. Die echte Kollaboration, bei der Mensch und Roboter gemeinsam zur selben Zeit im gemeinsamen Arbeitsraum am selben Werkstück arbeiten, ist mit 8 % der Fälle nur relativ selten vorzufinden (Bauer, Bender u. a. 2016, S. 39).

Der „Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies“ (siehe Abbildung 3.13) wird jährlich vom Marktforschungsunternehmen Gartner erstellt und geht davon aus, dass die Einführung einer neuen Technologie in fünf Phasen verläuft, die sich durch die wechselnden Erwartungen mit Ablauf der Zeit

unterscheiden: Nach der Innovation folgt der Gipfel überzogener Erwartungen, dann das Tal der Desillusionierung, der Anstieg der „Erleuchtung“ und als fünfte Phase das Plateau des produktiven Einsatzes einer neuen Technologie. Das Thema „Smart Robots“ sieht Gartner im Bereich des Gipfels der überzogenen Erwartungen, vom Erreichen des Plateaus des produktiven Einsatzes wird von Gartner in 5 bis 10 Jahren ausgegangen.

Hype Cycle for Emerging Technologies, 2018

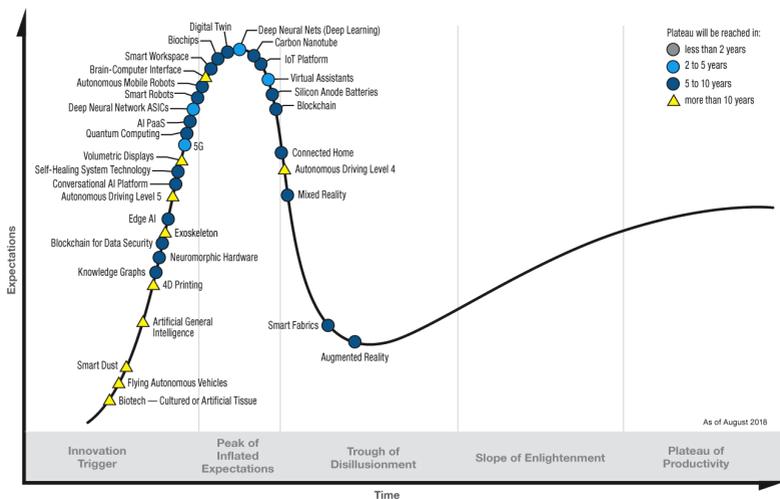


Abbildung 3.13: Gartner Hype Cycle for Emerging Technologies 2018, hier relevant „Smart Robots“. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/5-trends-emerge-in-gartner-hype-cycle-for-emerging-technologies-2018/> (abgerufen am 10.12.2019).

3.3 Zusammenfassung

Auf dem Weg zur Smart Factory mit der Losgröße 1 und teilweise kollaborativ erledigten Aufgaben sind in der Forschung schon zahlreiche Schritte gemacht wurden, während die Umsetzung in der Praxis in vielen Unternehmen

noch zögerlich und lückenhaft bleibt. Als generelle Forschungsaufgaben stehen aktuell die Aufgabenplanung für kooperative Systeme, die Persistierung, Darstellung und Analyse fertigungsbezogener Informationen, aber auch die Gewährleistung der Sicherheit und ökonomische Fragen im Raum. Auf dem Gebiet des Informationsmanagements wird die klassische Hierarchie der Automatisierungspyramide immer weiter aufgelöst. An ihre Stelle treten vernetzte Systeme ohne oder mit flacher Hierarchie. Dabei zeigten sich in vielen Projekten und Fallstudien die Vorteile einer zentralen Instanz, die zwischen den heterogenen Einzelsystemen für einen durchgängigen Informationsfluss sorgt. Dies kann beispielsweise ein Manufacturing Service Bus, ein Integration Bus oder auch eine ähnliche Lösung auf Basis einer geeigneten Middleware sein. Im Zusammenwirken zwischen cyber-physischen Systemen und menschlichen Werkern gilt es immer wieder die jeweiligen Stärken im Prozess zu nutzen, zum Beispiel die Präzision auf der einen und die Fähigkeit zu komplexen Reaktionen auf der anderen Seite. Aus ökonomischer Sicht füllt die kollaborative Montage die Lücke zwischen rein manueller Arbeitsweise und (Voll-)Automatisierung mit hohen Anfangskosten, die sich erst bei hohen Stückzahlen angemessen früh amortisieren. Informationsflüsse, die auf aktuellen Standards wie AutomationML und OPC UA basieren, haben sich schon in einigen Forschungsprojekten bewährt, wenn auch noch viele Detailfragen ungeklärt sind. Ein ebenfalls aktueller Ansatz zur Arbeitsplanung ist die fähigkeitsbasierte Produktionsplanung, die durch Finden von Übereinstimmungen zwischen den vorhandenen Fähigkeiten verschiedener Produktionsmittel und den zur Herstellung eines Produkts benötigten Fähigkeiten automatisiert einen Plan erstellt. Auch zur virtuellen Absicherung der Produktionsplanung durch Simulation gibt es bereits Ansätze, die damit nicht nur einen Beitrag zur Sicherheit, sondern auch zu ökonomischen Betrachtungen liefern. Im Interesse aktueller Forschung stehen Ansätze zur adäquaten Persistierung aus der Produktion gewonnener Daten und deren zu Zwecken der Überwachung und (Re-)Konfiguration geeignete Analyse und Darstellung.

4 Methodik für das Informationsmanagement

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die Grundlagen moderner industrieller Kommunikationsverfahren und der aktuelle Stand der Wissenschaft und Technik auf Basis einer umfangreichen Literaturrecherche dargestellt. Die darauf aufbauend im folgenden vorgestellte Methodik hat zum Ziel, durch effiziente Informationsflüsse die kollaborative Montage für alle Akteure zu vereinfachen und gleichzeitig wirtschaftlich attraktiver zu gestalten. Sie besteht aus mehreren Teilbereichen, die durch die gemeinsame Nutzung einer Integrationsinfrastruktur („Integration Bus“) miteinander verbunden sind.

Nach der Entwicklung der Anforderungen an ein ganzheitliches Informationsmanagement für die kollaborative Montage im folgenden Abschnitt wird in Abschnitt 4.2 der Einsatz einer zentralen Integrationsplattform als verbindendes Element der einzelnen Teillösungen vorgestellt. Hier werden die heterogenen Informationsquellen und -ziele miteinander verbunden und sie bildet daher einen wesentlichen Baustein der Methodik, der letztlich auch das Ziel eines Kreislaufs im Sinne einer iterativen Optimierung von Produkt und Anlage ermöglicht. Auf diesen Kreislauf wird dann näher in Abschnitt 4.3 eingegangen, das nicht nur den Lebenszyklus von Produkt und Anlage beschreibt, sondern auch insbesondere die Rolle der Simulation als virtuelle Absicherung in den Fokus stellt. Die Ansteuerung der kollaborativen Zelle mit ihren Akteuren Mensch und Roboter (Cobot) und ihren speziellen

Herausforderungen beschreibt der Abschnitt 4.5, in dem auch ein zu diesem Zweck entwickeltes Datenmodell und -format vorgestellt wird, das eine auf den kollaborativen Fall zugeschnittene Formulierung von Arbeitsplänen unterstützt. Deren Ausführung wiederum muss die Details der Synchronisation von Cobot und Mensch ermöglichen, die sowohl sequenziell als auch parallel oder auch unabhängig voneinander aktiv sein können. Die bei der Montage, gleichgültig ob real oder simuliert, entstehenden Prozessdaten und ihre Nutzung sind Gegenstand der beiden folgenden Kapitel. Sie können einerseits im Sinne eines Monitoring beobachtet und auch in Echtzeit ausgewertet werden, andererseits aber auch für die spätere Analyse persistiert und in geeigneter Weise zur Verfügung gehalten werden, was in Abschnitt 4.6 näher betrachtet wird. Dabei wird bei dem hier beschriebenen Ansatz durchgängig auf aktuelle Verfahren und Standards wie OPC UA aufgebaut. Das Monitoring und die spätere Analyse der Prozessdaten insbesondere im kollaborativen Fall hat Abschnitt 4.7 zum Inhalt. Mit Hilfe verschiedener Werkzeuge werden „Big Data“ in „Smart Data“ überführt, die also wertvolle Informationen über zurückliegende Montage-Schritte liefern und damit die Optimierung zukünftiger Produktion ermöglichen. Damit schließt sich der oben angesprochene Kreis des Informationsflusses bei der kollaborativen Montage.

4.1 Entwicklung der Anforderungen

Die meisten Fragestellungen, die sich bei der Gestaltung des Prozess- und Informationsmanagements der kollaborativen Montage ergeben, sind auch bei anderen nicht-kollaborativen Formen der Montage bekannt. Von der Idee über das Engineering, die verschiedenen Herstellungsschritte, den Verkauf bis hin zum Recycling durchläuft ein Produkt zahlreiche Phasen. Das Product Lifecycle Management (PLM) ist ein seit Jahren bekanntes, aber in

vielen produzierenden Unternehmen noch nicht oder nur teilweise umgesetztes Konzept. Eine Definition dieses Konzepts bilden die sog. „Liebensteiner Thesen“ (Sendler 2009, S. 27f):

- PLM ist ein Konzept, kein System und keine (in sich abgeschlossene) Lösung.
- Zur Umsetzung/Realisierung eines PLM-Konzeptes werden Lösungskomponenten benötigt. Dazu zählen CAD, CAE, CAM, VR, PDM und andere Applikationen für den Produktentstehungsprozess.
- Auch Schnittstellen zu anderen Anwendungsbereichen wie ERP, SCM oder CRM sind Komponenten eines PLM-Konzeptes.
- PLM-Anbieter offerieren Komponenten und/oder Dienstleistungen zur Umsetzung von PLM-Konzepten.

In diesem Rahmen soll sich auch die hier vorgestellte Methodik bewegen, die einzelne Teile eines für die kollaborative Montage geeigneten PLM-Konzeptes beinhaltet, die einerseits so generisch sind, dass sie nicht nur in einem speziellen Unternehmen eingesetzt werden können und an anderer Stelle wiederum so spezifisch sind, dass sie die spezielle Form der Montage in der Kollaboration von Mensch und Roboter mit darauf zugeschnittenen Methoden unterstützt. Daher werden einige allgemein gültige PLM-Aspekte hier ausgeklammert oder nur am Rande behandelt und stattdessen das Hauptaugenmerk auf die kollaborative Montage variantenreicher Produkte gelegt.

Kollaborative Prozesse erfordern umfassende und präzise Kontextbeschreibungen für die Interaktion von Mensch und Roboter, auch vom Informationsmanagement einen Beitrag zur Absicherung der Inbetriebnahme und Aufrechterhaltung der Sicherheit und ein umfassendes Konzept zur Erfassung, Speicherung und Analyse der Prozessdaten. Dies alles ist Voraussetzung für

ein variantenreiches Produktspektrum und die damit erforderlich werdende Flexibilität bei der Anpassung der Anlagen.

Aber nicht nur das eigentliche Produkt, sondern auch die Anlage, mit deren Hilfe es hergestellt wird, hat einen Lebenszyklus und assoziierte Daten, ist sogar selbst ein Produkt, zum Beispiel aus der Sicht des Maschinenbauers. Zwischen dem Lebensweg des eigentlichen Produkts und dem der es produzierenden Anlage gibt es Beziehungen, die umso enger sind, je spezifischer die Anlage auf ein einzelnes Produkt zugeschnitten ist. Die Vorteile der kollaborativen Montage aber entfalten sich insbesondere bei der Herstellung kleiner Serien und variantenreicher Produkte, weshalb die Anlage im Rahmen der Möglichkeiten allgemein und nicht zu produktspezifisch sein sollte.

Im Einzelnen können daraus die folgenden fünf Anforderungsbereiche an ein Informationsmanagement für die kollaborative Montage abgeleitet werden:

1. Digitaler Zwilling von Anlage und Produkt
2. Arbeitsplan und Steuerung (virtuell und real)
3. Persistierung der Prozessdaten
4. Kollaborationsspezifische Analyse der Prozessdaten
5. Monitoring der kollaborativen Prozesse

Digitaler Zwilling

Es bietet mehrere Vorteile, alle an der Montage beteiligten physisch existierenden Objekte, insbesondere Produkt und Anlage, vollständig digital abzubilden. Dieses Abbild wird auch als „Digitaler Zwilling“ bezeichnet. Dazu

gehören nicht nur die geometrischen Eigenschaften, sondern auch die Kinematik und alle weiteren bei der Montage relevanten Informationen. Auf Basis dieses digitalen Zwillings, also der virtuellen Repräsentation von Produkt und Anlage, können verschiedene Schritte der Planung optimiert und vollständig überprüft werden, bevor die eigentliche physische Montage stattfindet. Dazu gehört der Test der Anlagenkonstruktion, der Ablauf der Montage, aber auch die Detektion problematischer Zustände und Ereignisse wie zum Beispiel Kollisionen zwischen Werker und Roboter, die zu Verletzungen führen könnten. Die virtuelle Absicherung und Inbetriebnahme durch Simulation sind also weitere wichtige Schritte, die der digitale Zwilling erst ermöglicht. Gerade mit dem Ziel der flexiblen Adaption der Anlage an ein breites Spektrum von Produktvarianten sind diese Möglichkeiten essentiell.

Die Anforderungen an ein die interaktive kollaborative Montage unterstützendes Informationsmanagement umfassen also die Erfassung und Speicherung aller Facetten des digitalen Zwillings von Produkt und Anlage. Weiterhin sollen diese Daten adäquat zugreifbar und für die Simulation und die Konstruktion zur Verfügung gestellt werden. Dabei muss ein geeignetes Datenmodell verfügbar sein, aus dem weitere erforderliche Datenmodelle, zum Beispiel zur Unterstützung der Kommunikation zwischen Steuerung und simulierter oder realer Zelle, generiert werden können.

Arbeitsplan und Steuerung

Mit dem Produktvariantenreichtum entsteht auch der Bedarf einer flexiblen Anpassung des Arbeitsplans an verschiedene Montagesituationen. Die Erstellung von Arbeitsplänen kann manuell, teilautomatisiert oder auch vollständig automatisiert erfolgen, zum Beispiel auf der Basis bekannter Fähigkeiten der Assets und erforderlicher Fähigkeiten zur Montage einer bestimmten Produktvariante. Dieser Weg der fähigkeitsbasierten Arbeitsplanung wurde bereits umfassend untersucht (Aleksandrov, Schubert und Ovtcharova 2014;

Pfrommer, Stogl u. a. 2014; Schleipen u. a. 2014), so dass er hier ausgeklammert werden soll. Stattdessen liegt der Fokus der hier beschriebenen Methodik auf der Ausführung eines bereits existierenden Arbeitsplans unter besonderer Berücksichtigung der sich für die kollaborative Montage ergebenden Fragestellungen und aktueller Industriestandards.

Daraus ergibt sich als Teilanforderung die Möglichkeit der Speicherung von Arbeitsplänen in einem auf die speziellen Anforderungen der kollaborativen Montage abgestimmten Datenmodell und -format. Bei der Steuerung des Montageablaufs in der realen oder virtuellen Anlage sollen diese ebenfalls Berücksichtigung finden, insbesondere bei der Koordination der durch den Roboter und der durch den Menschen oder auch gemeinsam ausgeführten Schritte, bei der sich verschiedene Fragen zur Synchronisation ergeben. Die gesamte Steuerung soll dabei aktuellen Industriestandards entsprechen und ausreichend generisch sein, um nicht von bestimmten Roboterherstellern oder -typen abzuhängen.

Monitoring der Montageprozesse

Wie die meisten industriellen Prozesse sollen auch kollaborative Montageprozesse, während sie stattfinden, überwacht werden, damit bei Unregelmäßigkeiten eingegriffen und eine erneute Stabilität des Ablaufs hergestellt werden kann. Auch für die direkte Beobachtung von veränderten Rahmenbedingungen oder Abläufen ist es erforderlich, jederzeit einen aktuellen und umfassenden Überblick über den Zustand der Anlage zu haben. Von etablierten nicht-kollaborativen Prozessen können dabei viele bekannte Indikatoren (zum Beispiel Durchlaufzeiten) übernommen werden. Jedoch ergeben sich durch die besonderen Eigenschaften der von Mensch und Cobot gemeinsam durchgeführten Arbeitsschritte zusätzliche besondere Merkmale (Key Performance Indicator), die im Rahmen des Monitorings beobachtet werden sollen.

Dabei soll auch hier durch die konsequente Nutzung von OPC UA als Standard die optimale Verfügbarkeit für weitere Informationskonsumenten hergestellt und eine innerhalb der Gesamtmethodik einheitliche Darstellung und Homogenisierung der Datenmodelle und -flüsse angestrebt werden. Dazu müssen an der realen oder virtuellen Montagezelle alle verfügbaren Daten über ihren Zustand zur Verfügung gestellt werden. Diese sollen dann von einem für das Monitoring geeigneten Werkzeug in Beinahe-Echtzeit abgerufen, ausgewertet und dargestellt werden. Dieses erlaubt dem Benutzer, den Zustand der kollaborativen Zelle zu bewerten und Abweichungen von der Erwartung zu erkennen.

Persistierung von Prozessdaten

Eine sich direkt aus der Forschungsfrage ergebende Anforderung betrifft die adäquate Persistierung aller bei der kollaborativen Montage entstehenden Prozessdaten, da diese im Sinne eines Kreislaufs permanenter Produkt(ions)verbesserung für zukünftige Engineering-Schritte zur Verfügung stehen sollen (siehe auch Abbildung 4.1). Die bei der Ausführung entstehenden Daten sollen jedoch nicht nur gespeichert, sondern auch in einer für die weitere Nutzung, insbesondere die Analyse zum Zwecke des Re-Engineering, geeigneten Form wieder zur Verfügung gestellt werden. Im Rahmen der konsequenten Nutzung von OPC UA als Grundlage der Informationsflüsse ist es auch an dieser Stelle wünschenswert, die historischen Daten gemäß Teil 11 der Spezifikation („Historical Access“) zur Verfügung zu stellen. Abgesehen von der Auswahl und Semantik der zu speichernden Daten gibt es in diesem Anforderungsbereich keine für die kollaborative Montage spezifischen Fragestellungen. Dennoch ist er integraler Bestandteil eines kollaborativen Informationsmanagements, das unter anderem auch die flexible Anpassung von Montageplätzen und die schnelle Wandelbarkeit im Hinblick auf andere Produktvarianten zum Ziel hat.

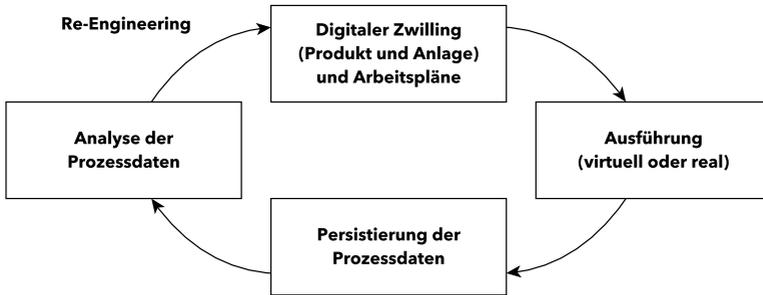


Abbildung 4.1: Prozessdaten im Kreislauf der kontinuierlichen Produktionsoptimierung.

Analyse von Prozessdaten

Der in Abbildung 4.1 dargestellte Kreislauf wird vervollständigt durch die Analyse der bei früheren Montageprozessen erfassten Daten. Dabei soll die Analyse insbesondere bestehende Optimierungspotenziale aufzeigen, mit deren Ausschöpfung der kollaborative Prozess weiter verbessert werden könnte, einerseits unter ökonomischen Aspekten, andererseits aber auch im Hinblick auf weitere Ziele wie Ergonomie, Sicherheit oder Produktqualität. Die besondere Herausforderung besteht hier in der Identifikation geeigneter Indikatoren zur Bewertung verschiedener Aspekte der kollaborativen Montage. Diese müssen dann entsprechend statistisch und grafisch aufbereitet und über geeignete Schnittstellen zur Verfügung gestellt werden.

4.2 Manufacturing Integration Bus

In diesem Kapitel wird ein Verfahren vorgestellt, das als zentrale Instanz den Informationsfluss bei der kollaborativen Montage steuern kann und damit das Rückgrat der Datenströme und zugleich die Basis der Integration verschiedener Systeme bildet. Aufgrund dieser wesentlichen Rolle bei der

Integration der Datenflüsse bei der Montage trägt es den Namen „Manufacturing Integration Bus“ (Schneider 2019).

Einen vereinfachten Überblick über die verschiedenen Aufgaben des Manufacturing Integration Bus im Kontext der gesamten Methodik gibt Abbildung 4.2. Grundsätzlich sind zwei Phasen zu unterscheiden: die erste umfasst alle Aktivitäten bis zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme der realen Zelle und dem Beginn der tatsächlichen Montage, die zweite beginnt in diesem Moment. Die zur Montage eines Produkts vorgesehene Zelle existiert, ebenso wie das Produkt selbst, in der ersten Phase nur als Digitaler Zwilling, der im AutomationML-Format beschrieben und iterativen konstruktiven Anpassungen unterworfen ist. Diese können durch physikalische Simulation der Montage unterstützt werden. Bereits in dieser Phase könnte der Manufacturing Integration Bus alle Integrationsaufgaben übernehmen, obwohl in der praktischen Anwendung dies in den meisten Fällen erst in der zweiten Phase, der eigentlichen Montage, erforderlich sein dürfte. Bis zu diesem Zeitpunkt werden dennoch bereits alle Planungs- und Konstruktionsdaten der Zelle vom Manufacturing Integration Bus erfasst.

Spätestens sobald die reale Anlage in Betrieb genommen wurde, übernimmt der Manufacturing Integration Bus auch die Aufgabe der Steuerung der kollaborativen Zelle auf Basis der durch den Konfigurator oder das ERP-System bereitgestellten Auftragsdaten. Zur Beschreibung der Arbeitspläne wird ein eigens entwickeltes Datenformat und zur Ansteuerung der Zelle eine für die kollaborative Montage entwickelte Steuerungslogik verwendet, die in Abschnitt 4.5 auf Seite 92 beschrieben ist. Die Kommunikation mit der Zelle erfolgt dabei ausschließlich über OPC UA.

Der aktuelle Zustand der Zelle wird repräsentiert durch einen OPC-UA-Server mit entsprechend modellierter und auf der Beschreibung der Zelle in AutomationML basierenden Knotenstruktur, der diese Daten dem Integration Bus zur Verfügung stellt. Dieser agiert als OPC-UA-Client und verwendet

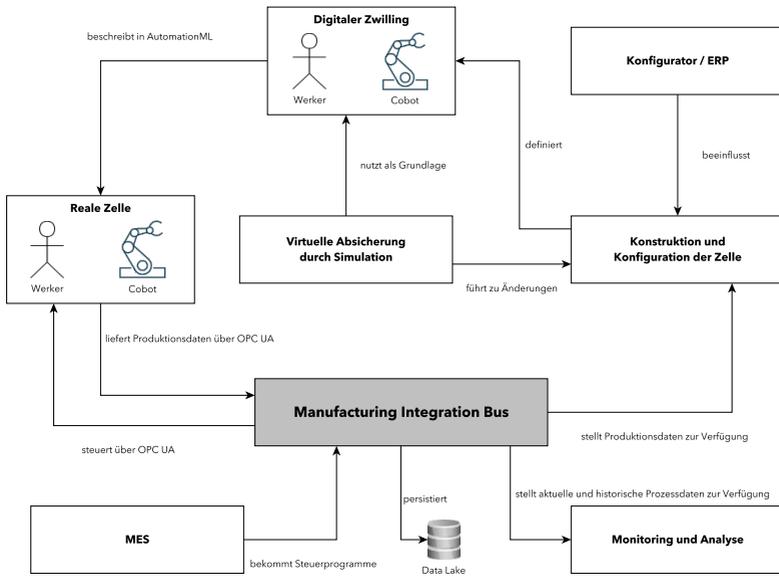


Abbildung 4.2: Übersicht zur Rolle des Manufacturing Integration Bus im Kontext der gesamten Methodik. Vergrößerung in Abbildung A.3 auf Seite 154.

die Zustandsdaten aus der Zelle in mehrfacher Weise. Einerseits dienen sie als Grundlage der Zellensteuerung, andererseits werden sie aber auch für Zwecke des Monitorings benötigt und zusätzlich für die spätere Verwendung bei der Analyse persistiert. Damit ergibt sich die letzte wesentliche Aufgabe des Manufacturing Integration Bus: er stellt die gespeicherten Prozessdaten für Analysezwecke zur Verfügung, zum Beispiel per OPC UA Historical Access (Teil 11 der Spezifikation, OPC Foundation (2015)).

Die Realisierung der oben beschriebenen Funktionalitäten erfordert neben einer einheitlichen Vernetzung (auf IP-Basis) eine Instanz, die einerseits verschiedene Protokolle und Formate verarbeiten kann und andererseits die Konfiguration komplexer Prozesse erlaubt. Der Manufacturing Integration Bus kann daher mit Hilfe einer geeigneten Integrationsplattform, die genau

diese Möglichkeiten bietet, implementiert werden. Ähnliche Konzepte kommen bereits seit Jahren in anderen Bereichen wie der Integration betriebswirtschaftlicher Daten zum Einsatz und werden auch als „Enterprise Service Bus“ bezeichnet. Es sind einige Produkte dieser Klasse am Markt vertreten, bei der Implementierung der hier beschriebenen Methodik kommt die Seeburger Business Integration Suite¹ zum Einsatz. Sie besteht aus einer Reihe von Werkzeugen, die gemeinsam die Modellierung und Automatisierung von Datenaustauschprozessen auch im Industrial Internet of Things erlauben. Im Mittelpunkt steht der BIS Integration Server, der mit zahlreichen Protokoll-Adaptoren auf Basis etablierter Standards wie Business Process Execution Language (BPEL) den Austausch von Daten auf den verschiedensten Wegen ermöglicht. Gleichzeitig kann mit dem Business Integration Converter mit Hilfe von Mappings auch eine Konversion in verschiedenste Datenformate durchgeführt werden. Ein Beispiel für einen einfachen Prozess ist die Annahme einer XML-Datei über SFTP, eine Konvertierung des Formats und die Weitergabe der veränderten Datei über eine HTTP-basierte API.

Die an den Manufacturing Integration Bus angebotenen Systeme mit ihren Schnittstellen zeigt Abbildung 4.3 auf der nächsten Seite, die den Schwerpunkt im Vergleich zur Abbildung 4.2 nicht auf die Bedeutung der einzelnen Verknüpfungen, sondern auf deren technische Realisierung mit verschiedenen Schnittstellen und Protokollen setzt. Vom ERP-System erhält der Manufacturing Integration Bus den eigentlichen Auftrag zur Montage einer bestimmten Variante eines Produkts über eine je nach verwendetem ERP-System anpassbare API. Die zur Ausführung erforderlichen kollaborativen Arbeitspläne hält das MES bereit und stellt diese über einen SFTP-Client (oder alternativ eine individuelle API) bereit. Der Arbeitsplan kann nun in der Simulation, zu der der Datenaustausch in dem in Abschnitt 4.5 näher beschriebenen Format CollabML per SFTP erfolgt, virtuell geprüft werden. Dabei werden alle Arbeitsschritte physikalisch simuliert, so dass Kollisio-

¹ <https://www.seeburger.de>

nen oder andere bisher unbekannte Schwierigkeiten erkannt werden können. Eventuell erforderliche Anpassungen werden dem Manufacturing Integration Bus wiederum im CollabML-Format per SFTP als geprüfter Arbeitsplan zurückgegeben (Schneider 2019).

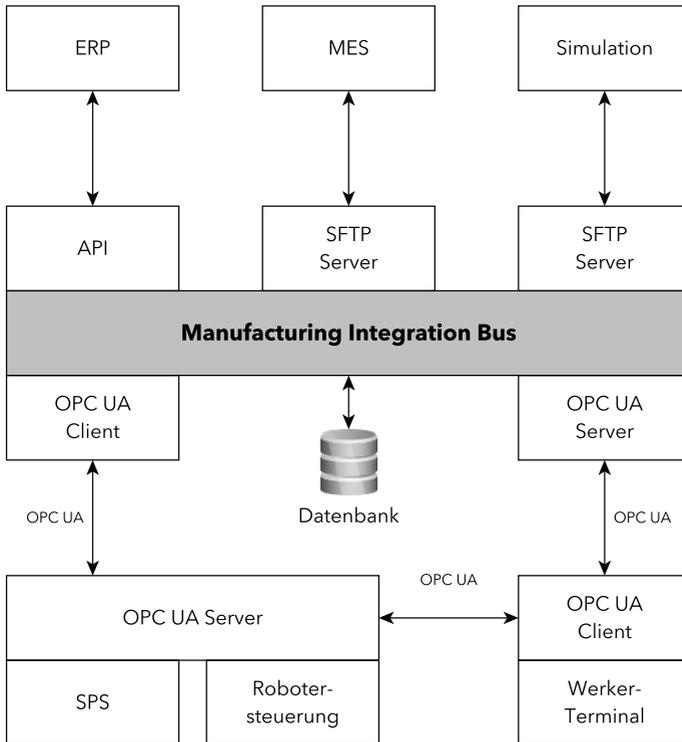


Abbildung 4.3: Der Manufacturing Integration Bus mit den angebenen Systemen und Schnittstellen.

Dieser Arbeitsplan kann nun in der realen Montagezelle zur Ausführung gebracht werden, wobei die eigentliche Steuerung ganz oder teilweise vom Manufacturing Integration Bus übernommen werden kann. Möglich ist auch eine zweistufige Ausführung der einzelnen Schritte des Arbeitsplanes, bei

der die Steuerung die Details der Kollaboration an die Zelle oder den Werker delegiert (siehe auch Abschnitt 4.5 auf Seite 92). Aus der Sicht des Manufacturing Integration Bus erfolgt die gesamte Kommunikation mit der Montagezelle (untere Hälfte der Abbildung 4.3) per OPC UA. Der im Manufacturing Integration Bus integrierte OPC-UA-Client ruft auf dem OPC-UA-Server, der an SPS und Robotersteuerung unmittelbar angeschlossen ist, entsprechende OPC-UA-Methoden auf, die Aktionen in der Zelle starten. Ein als HMI ebenfalls per OPC UA verbundenes Werker-Terminal bildet einerseits die Schnittstelle zum Werker und gestattet andererseits Eingriffe in den kollaborativen Arbeitsablauf. Über den in den Manufacturing Integration Bus integrierten OPC-UA-Server kann der die Kommunikation des Werker-Terminals steuernde OPC-UA-Client auch Arbeitspläne abrufen, insbesondere für den Fall, dass die Steuerung nicht vom Manufacturing Integration Bus selbst übernommen wird.

Über diese OPC-UA-Verbindungen empfängt der OPC-UA-Client des Manufacturing Integration Bus aber auch die Zustandsdaten der Anlage, die der OPC-UA-Server zur Verfügung stellt. Diese sind im Allgemeinen nur die aktuellen Zustandsdaten (Modus „Data Access“), so dass eine weitere Funktion des Manufacturing Integration Bus in der Persistierung der Prozessdaten für spätere Analyse Zwecke besteht. Der integrierte OPC-UA-Server stellt die Daten im Modus „Historical Access“ über längere Zeiträume vollständig oder aggregiert für die Analyse zur Verfügung.

Damit ist der Manufacturing Integration Bus die zentrale Instanz des an kollaborative Montage mit aktuellen Standards angepassten Product Lifecycle Managements und enthält mehrere Komponenten, die die einzelnen Anforderungen abdecken. Diese einzelnen Komponenten, ihre Aufgaben und ihre Rolle im gesamten System wird in den folgenden Kapiteln näher beschrieben. Einen Überblick dazu gibt Abbildung 4.4.

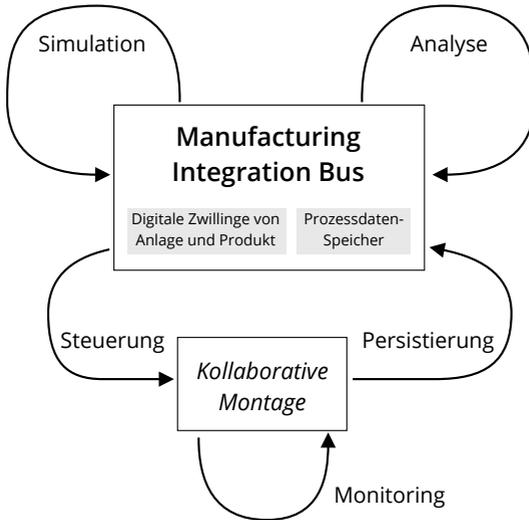


Abbildung 4.4: Überblick über die einzelnen Komponenten der Gesamtmethodik mit dem Manufacturing Integration Bus im Zentrum.

Im Mittelpunkt steht der Manufacturing Integration Bus, der die digitalen Zwillinge von Produkt und Anlage und die bei der Montage gewonnenen Prozessdaten speichert und sie den darum angeordneten Prozessen im passenden Format zur Verfügung stellt. Auf dieser Basis kann die Simulation beliebig oft wiederholt werden, aber auch die Steuerung der Montage gestartet oder eine Analyse historischer Daten durchgeführt werden. Während der Montage ist das Monitoring aktiv, dessen Ergebnisse wiederum Einfluss auf die laufende Montage haben können. Die bei der Montage entstehenden Prozessdaten werden vom Manufacturing Integration Bus gespeichert und stehen dort für spätere Analysen zur Verfügung.

4.3 Produkt- und Anlagen-Lebenszyklus

Sowohl das montierte Produkt selbst als auch die dazu verwendeten Produktionsmittel unterliegen einem Lebenszyklus. Während das Management des Produktlebenszyklus weit verbreitet ist und diverse Vorteile bekannt sind (Ameri und Dutta 2005; J. Stark 2015), ist dies bei der analogen Sichtweise auf die Anlage selbst noch nicht in diesem Maße der Fall. Doch die Montage zahlreicher Varianten eines Produkts in relativ geringen Stückzahlen (siehe auch Unterabschnitt 2.3.1 auf Seite 28) und die damit einhergehende möglichst flexible Wandelbarkeit der Anlage rücken zunehmend die Sichtweise in den Vordergrund, auch die Anlage selbst als Produkt mit den bekannten Phasen innerhalb des Lebenszyklus zu sehen.

Die Lebenszyklen von Produkt und Anlage sind in Abbildung 4.5 schematisch dargestellt. Das Produkt entsteht vom Konzept über die Entwicklung und Prototypen, wird hergestellt, genutzt und letztlich recycelt. Die dazu notwendige Anlage wird entwickelt, simuliert, aufgebaut, betrieben, zurückgebaut und ebenfalls recycelt. Auch wenn die Beschaffenheit des Produkts bereits auf die Entwicklung der Anlage einwirkt, ist der entscheidende Berührungspunkt die Herstellung des Produkts durch den Betrieb dieser Anlage. Im Fall kollaborativer Montage variantenreicher Produkte ist hier ein weiterer Zyklus zu finden, der neben der Produktion die wiederholte Rekonfiguration der Anlage beinhaltet, die durch Simulation geprüft werden kann (siehe auch Abbildung 4.1 auf Seite 74). Die Simulation spielt also sowohl während der Anlagenplanung als auch während des Betriebs eine besondere Rolle, wobei in der Praxis aus wirtschaftlichen Gründen der regelmäßige Einsatz auch entfallen kann (siehe auch Abbildung 4.3). Voraussetzung dieser Vorgehensweise ist die Modellierung von Produkt und Anlage einschließlich Kinematik als „Digitaler Zwilling“.

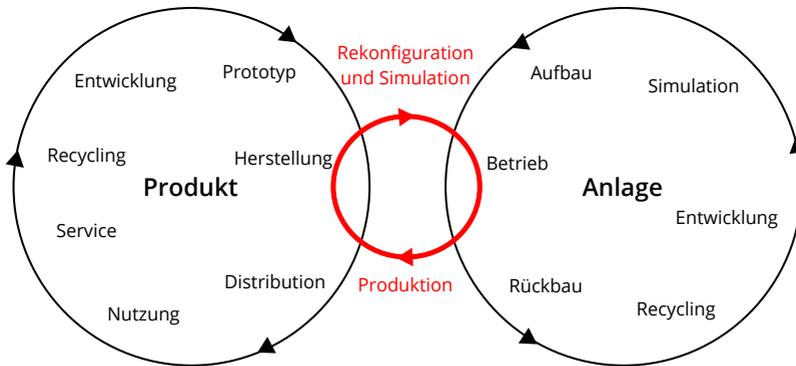


Abbildung 4.5: Lebenszyklen von Produkt und Anlage und ihr Berührungspunkt bei der Montage von Produktvarianten durch Rekonfiguration und Simulation.

Dabei kommt das in Unterabschnitt 2.4.1 auf Seite 32 erwähnte AutomationML-Format zum Einsatz, das als Containerformat dient und unter anderem die Geometrie und Kinematik von Produkt und Anlage als CAEX-Format enthält und damit insbesondere für die Ausführung der Simulation die Basis bildet. Der Arbeitsplan wird im CollabML-Format gespeichert, das wiederum weitere XML-Dateien referenziert, die die Arbeitsanweisungen für die einzelnen Ressourcen enthalten. Je nach betrieblichem Umfeld kann hier auch ein PDM und/oder MES zum Einsatz kommen, was an dieser Stelle jedoch nicht weiter vertieft werden soll, da es nicht im Rahmen der Zielsetzung dieser Arbeit liegt. Die Anpassung dieses Konzepts an reale Fälle aus der industriellen Praxis wird in den beiden weiteren Hauptkapiteln beschrieben.

Den gesamten Ablauf einer kollaborativen Montage von der Bestellung bis zum fertigen Produkt in den Bereichen Planung und Montage zeigt überblicksartig Abbildung 4.6 in BPMN-Notation. Die Nachricht, die den Prozess startet, kann eine Bestellung aus einem beliebigen System sein, das die Definition einer Produktvariante erlaubt, also zum Beispiel ein Produktkonfigurator, der direkt dem Kunden zur Verfügung steht, ein interner Konfigu-

rator oder auch eine ERP-Instanz. Für den Fall, dass exakt die in Auftrag gegebene Variante bereits schon einmal montiert wurde und die Umstände sich seitdem nicht signifikant geändert haben, kann unmittelbar mit der Montage durch Ausführung des bereits vorhandenen und erprobten Arbeitsplans begonnen werden.

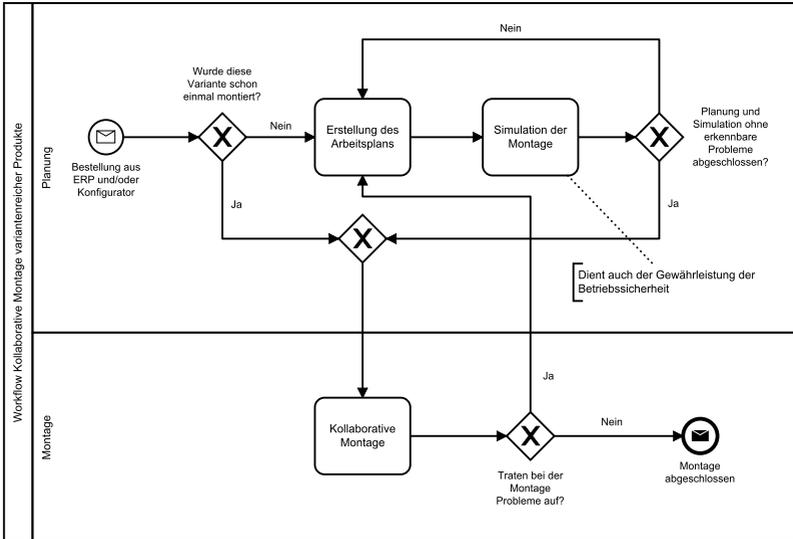


Abbildung 4.6: Workflow bei der kollaborativen Planung und Montage eines variantenreichen Produkts.

Handelt es sich um eine bisher noch nicht geplante Variante, werden im nächsten Schritt die erforderlichen Grundlagen wie die Stückliste und der Arbeitsplan erstellt, der dann in der Simulation geprüft wird. Sollten sich dabei Probleme zeigen, zum Beispiel Kollisionen zwischen Anlagenteilen oder sicherheitsrelevante Probleme, wird die Planung überarbeitet. Diese beiden Schritte werden iterativ so lange wiederholt, bis die Simulation erfolgreich war und mit der Montage begonnen werden kann.

Die zentrale Rolle beim Management dieser Abläufe nimmt im Rahmen der vorliegend vorgestellten Methodik der in Abschnitt 4.2 beschriebene Manufacturing Integration Bus ein. Für den Fall, dass kein MES oder PDM angebunden ist, verwaltet und speichert er die Produktkonfigurationen, Arbeitspläne und Stücklisten, ansonsten hat er eine Schnittstelle zu diesen Systemen und stellt der Simulation und der Ausführung diese Datensätze zur Verfügung (siehe auch Abbildung 4.3).

Dieser Ablauf ist auch Teil der „KoKoMo-Methode“, benannt nach dem BMBF geförderten Forschungsprojekt „KoKoMo - Kompetenz Kollaborative Montage“, die im Überblick in Abbildung 4.7 dargestellt ist. Hier sind von oben nach unten die Schritte auf dem Weg von der kundenindividuellen Bestellung bis zum fertigen Produkt und ihre Verknüpfungen wiedergegeben. Soll eine bereits bekannte Konfiguration montiert werden, kann sofort die Produktionsplanung begonnen werden, ansonsten folgt zunächst die Generierung grundlegender Daten wie der Produkt-Identifikationsnummer, der Stückliste und des Arbeitsplans. Auf deren Basis kann die Reihenfolge der Aufträge geplant werden und die Zuteilung zu vorhandenen Ressourcen erfolgen. Letzteres erfolgt im Idealfall fähigkeitsbasiert (siehe auch Unterabschnitt 3.1.3).

Ist der jeweiligen Ressource das Produkt schon bekannt, kann unmittelbar mit der kollaborativen Montage begonnen werden. Ansonsten wird der gesamte Montageablauf in der physikalischen Simulation geplant und geprüft, insbesondere zum einen unter dem Aspekt der Sicherheit, denn es gilt Kollisionen und andere Ereignisse, die im schlimmsten Fall zu Verletzungen führen, zu vermeiden. Zum anderen findet hier die Roboterprogrammierung und Generierung kollisionsfreier Roboterbahnen und die Abschätzung der Durchlaufzeiten statt. Die nicht-deterministischen Aktionen des Menschen werden durch VR-Simulation berücksichtigt. Auf diese Weise können potenzielle Kollisionen und andere Gefahren erkannt werden. Eine wesentliche

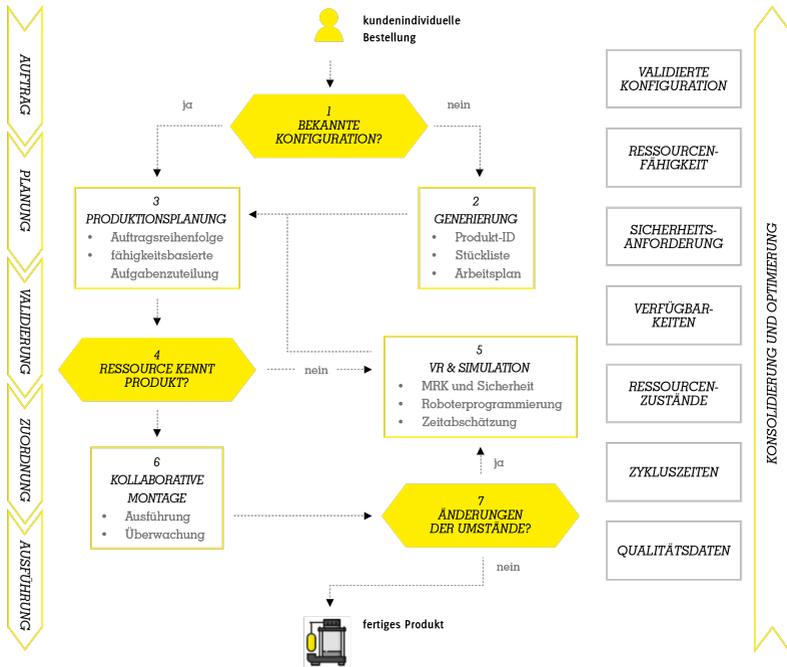


Abbildung 4.7: Die KoKoMo-Methode: Workflow von der Bestellung zum finalen Produkt nach Herfs, Storms, Roggendorf, Petrovic, Schubert, Schneider, ErKayhan, Rückert, Tracht und Heinen 2019, S. 57. Vergrößerung in Abbildung A.2 auf Seite 153.

Grundlage der Simulation ist die Verwendung eines umfangreichen Digitalen Zwillings von Produkt und Anlage (siehe auch Abschnitt 4.4).

Während der kollaborativen Montage wird diese permanent überwacht, indem alle verfügbaren Daten einem Monitoring zugeführt werden. Verläuft sie ohne unerwartete Ereignisse und Änderung der Umstände, steht am Ende das fertige Produkt. Zeigen sich jedoch bei der Ausführung der realen Montage unerwartete Schwierigkeiten, kann jederzeit zur Simulation zurück-

gekehrt werden und hier eine Änderung der Feinplanung erfolgen (Rückert, Tracht, Herfs, Roggendorf, Schubert und Schneider 2019).

Die verschiedenen Informationsarten im rechten Teil der Abbildung entsprechen den links dargestellten Schritten und bauen von oben nach unten teilweise aufeinander auf. Der Datenfluss in der umgekehrten Richtung, also von unten nach oben, dient der Konsolidierung und Optimierung der Prozesse.

4.4 Digitaler Zwilling

Im Kontext der hier vorgestellten Methodik kommt die virtuelle digitale Repräsentation mehrerer realer Objekte zum Einsatz. Diese Modelle werden auch als „Digitaler Zwilling“ bezeichnet, ein Begriff, für den es (noch) keine einheitliche anerkannte Definition gibt. Die bisher am weitesten verbreitete und sehr häufig zitierte Definition von Glaessgen und Stargel (2012) lautet:

„Der **Digitale Zwilling** ist eine integrierte multiphysikalische, multiskalige, probabilistische Simulation eines komplexen Produkts und verwendet die besten verfügbaren physikalischen Modelle, Sensor-Updates usw., um das 'Leben' des entsprechenden Zwillings wiederzugeben.“

Obwohl diese Definition von Glaessgen und Stargel (2012) vor dem Hintergrund der Anwendung auf Luft- und Raumfahrzeuge gegeben wurde, hat sie doch eine hohe Allgemeingültigkeit. Zahlreiche weitere Definitionen existieren, jeweils für einen begrenzten Anwendungsbereich (Tao u. a. 2018; R. Stark, Kind und Neumeyer 2017).

Neben vielen anderen Anwendungsgebieten kann das Konzept des Digitalen Zwillings auch in der Produktion und insbesondere der Montage sinnvoll

eingesetzt werden, und zwar in mehreren Stadien des Lebenszyklus von Produkt und Anlage von der Konzeptphase über das Design bis zur Feinplanung und in besonderen Fällen sogar bis zur Wartung. Der obigen Definition folgend kann der Digitale Zwilling dabei grundsätzlich zahlreiche Merkmale umfassen, wobei in den meisten Anwendungsfällen nur eine bedeutend weniger mächtige echte Teilmenge der theoretisch möglichen Entitäten zum Einsatz kommen wird. Im Rahmen der hier vorgestellten Methodik werden das Produkt und die Anlage zu seiner Montage virtuell repräsentiert.

Diese Abbilder von Produkt und Anlage entstehen während der Produktentwicklung und stellen eine Beschreibung einer Klasse von Objekten dar. Der Digitale Zwilling des Produkts enthält unter anderem Konstruktionsdaten, Funktionsbeschreibungen und Montageinformationen und ist auch Teil des PLM-Systems (Herfs, Storms, Roggendorf, Petrovic, Schubert, Schneider, ErKayhan, Rückert, Tracht und Heinen 2019, S. 54). Im Laufe des Produktlebenszyklus wird der Digitale Zwilling in mehreren Schritten mit weiteren Informationen angereichert (siehe auch Abbildung 1.3 auf Seite 7). Bei einem Produkt ohne Varianten könnte der vollständige Arbeitsplan mit Informationen zu Durchlaufzeiten oder der Nutzung von Betriebsmitteln bereits enthalten und Ergebnis der Produktentwicklung sein. Bei variantenreichen Produkten ist ein anderer Weg sinnvoll, der im Folgenden ausführlicher beschrieben wird und direkt Bezug nimmt auf Teilforschungsfrage **F2**. Nur am Rande wird auf die Physikalische Simulation selbst eingegangen, die in dieser Methodik zwar genutzt wird, deren Details aber nicht Thema dieser Arbeit sind.

Grundlage der weiteren Nutzung ist also die Beschreibung von Produkt und Anlage, die in AutomationML (siehe auch Unterabschnitt 2.4.1 auf Seite 32) erfolgen kann. Dazu stehen verschiedene Editoren zur Verfügung, z. B. der Asset Configuration Manager aus dem Skillpro-Projekt (Pfrommer, Stogl u. a. 2014). Ein für die Simulation zentraler Bestandteil ist das Modell des verwendeten Roboters, das im Allgemeinen vom Roboterhersteller zur Verfü-

gung gestellt wird. Dieses muss kinematisiert werden und bildet zusammen mit den übrigen Bestandteilen der Anlage den Digitalen Zwilling der Anlage. Auch zu einer verallgemeinerten Beschreibung des Produkts, die alle Varianten umfasst, eignet sich AutomationML.

Einen Überblick über die Art und Weise der Nutzung des Digitalen Zwillings in dieser Methodik gibt Abbildung 4.8, deren Zentrum wiederum eine bestimmte Sichtweise auf den Manufacturing Integration Bus mit einigen Verarbeitungsschritten des Digitalen Zwillings bildet.

Ausgangspunkt sind der für alle Varianten des Produkts gültige Digitale Zwilling des Produkts, die Beschreibung der Anlage und ihrer Fähigkeiten und die Konfiguration einer einzelnen speziellen Variante. Zur Ablage der Produktdaten wird häufig ein PDM-System verwendet, der einzelne Auftrag zur Montage einer bestimmten Variante des Produkts wird im Allgemeinen in einem ERP-System verwaltet. Diese Informationen werden im Manufacturing Integration Bus zusammengeführt und mittels einer fähigkeitsbasierten Aufgabenzuteilung zu einer auf die konkrete einzelne Produktvariante bezogenen Arbeitsplanung aggregiert. Diese wird in CollabML (siehe auch Anhang A.2) gespeichert, das im Anhang in seiner einfachsten Version beschrieben und mit einem Beispiel versehen ist. Bereits an dieser Stelle ist die Entscheidung enthalten, ob eine bestimmte Aufgabe vom Roboter, vom Werker oder auch von beiden erledigt werden *kann*.

Der folgende Schritt könnte entfallen, wenn die Simulation CollabML als Eingabeformat akzeptieren würde. Da dies in den für Tests verwendeten Implementierungen nicht der Fall war und auch allgemein nicht davon ausgegangen werden kann, wird der Arbeitsplan im nächsten Schritt vom Manufacturing Integration Bus in ein für die Simulation als Eingabe geeignetes Format transformiert (siehe auch Mitte der Abbildung 4.8). In dieser Form kann die kollaborative Montage auf Basis des konkreten Arbeitsplans für die spezielle Variante simuliert werden.

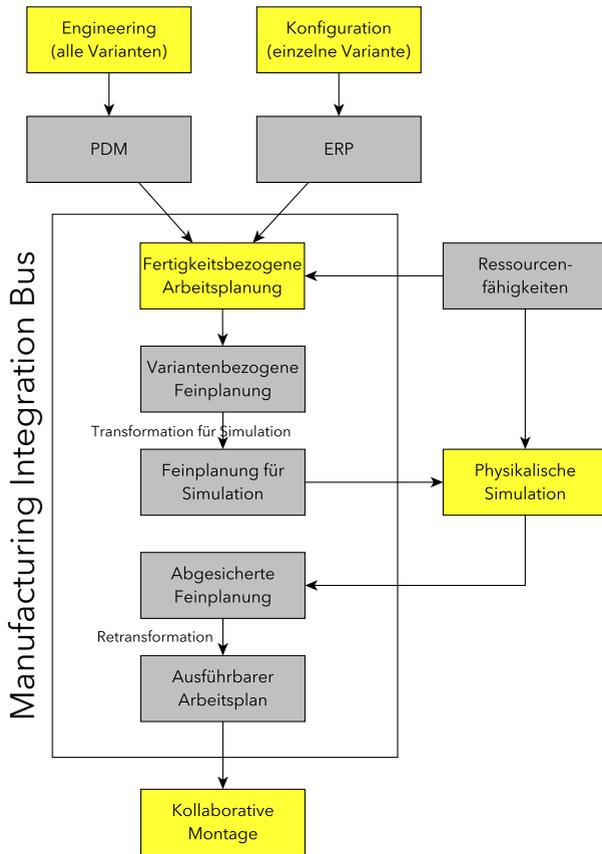


Abbildung 4.8: Stufen der Nutzung des Digitalen Zwillings von der Konfiguration einer Variante bis zur Ausführung der kollaborativen Montage.

Die sich anschließende Simulation (siehe auch Abbildung 4.9) verfolgt mehrere Ziele: Einerseits soll die Arbeitsplanung weiter verfeinert werden, indem bisher fehlende Parameter ergänzt werden, zum Beispiel die präzise Bahnplanung des Roboters. Dies kann auch mittels Teaching erreicht werden, falls erforderlich. Andererseits dient die Simulation aber auch der Absicherung

des Arbeitsplans im Sinne einer möglichen kollisionsfreien Ausführung. Eine in der Simulation entdeckte Kollision kann in diesem Stadium noch ohne weiteren physischen Schaden an der Anlage durch Anpassung des Arbeitsplans korrigiert werden (Rückert, Tracht, Herfs, Roggendorf, Schubert und Schneider 2019).

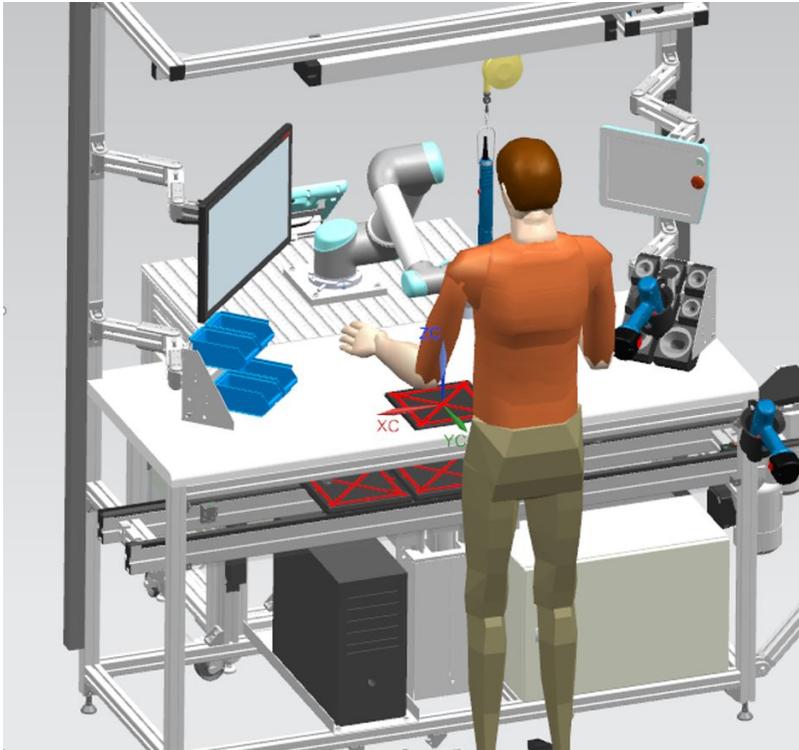


Abbildung 4.9: Screenshot von der Nutzung des Digitalen Zwillings zur Simulation der kollaborativen Montage am Beispiel der Experimentellen Modularen Montageanlage (EMMA) des Bremer Instituts für Strukturmechanik und Produktionsanlagen (BIME).

Dabei geht es nicht nur um Kollisionen zwischen Anlagenteilen, sondern natürlich im kollaborativen Fall um auch um mögliche Gefahren für den Werker.

Das Verhalten des Werkers ist nicht determiniert und daher schwer zu simulieren. Ein möglicher Ansatz ist die Verwendung von AR/VR-Methoden zur Abbildung des normalen Verhaltens eines menschlichen Werkers. Ungewöhnliche und unerwartete Verhaltensweisen des Werkers können mit diesem Ansatz jedoch nicht berücksichtigt werden. Am Ende der Simulation (und nach eventuell iterativer Anpassung des Arbeitsplans) steht eine abgesicherte Feinplanung, die an den Manufacturing Integration Bus zurückgegeben und dort in das ursprüngliche CollabML-Format retransformiert wird. Der Datenaustausch zwischen Manufacturing Integration Bus und Simulation kann dabei aus simplen SFTP-Verbindungen bestehen.

Der resultierende finale Arbeitsplan wird im Manufacturing Integration Bus bereitgehalten und kann jederzeit zur Steuerung der kollaborativen Montage verwendet werden. Der Digitale Zwilling besteht weiterhin und wird auf Basis weiterer Erkenntnisse aus der tatsächlichen Montage kontinuierlich angepasst. Dieser umfangreichere Zyklus der iterativen Anpassung der digitalen Grundlagen der Montage wird in den folgenden Kapiteln beschrieben, die sich mit der Erfassung, dem Monitoring und der Analyse der bei der realen kollaborativen Montage entstehenden Daten beschäftigen.

Die oben beschriebene Nutzung eines Digitalen Zwillings bei der Planung und Absicherung der kollaborativen Montage beantwortet die Teilforschungsfrage **F2**, indem sie zur Steigerung der Sicherheit und Effizienz der kollaborativen Montage beiträgt. Die komplexe Frage der Aufteilung der einzelnen Aufgaben zwischen Mensch und Roboter (Blankemeyer u. a. 2019) ist damit jedoch erst teilweise beantwortet, wie sich im folgenden Kapitel zeigen wird, das die Steuerung der kollaborativen Montage beschreibt.

4.5 Steuerung der kollaborativen Zelle

Eine weitere wichtige Komponente bei der kollaborativen Montage und der durch die Produktvariabilität geforderten einfachen und schnellen Rekonfigurierbarkeit der Anlage ist die adäquate Steuerung der Abläufe unter Einbeziehung aller Werker, Roboter und Werkzeuge (Ressourcen). Die hier vorgestellte Methode geht davon aus, dass bereits ein Arbeitsplan, der den Ablauf der Montage beschreibt, existiert. Dieser kann manuell in der Engineering-Phase festgelegt oder auch dynamisch erzeugt worden sein, zum Beispiel durch den Abgleich von benötigten und vorhandenen Fertigkeiten („Skills“) (siehe auch Unterabschnitt 3.1.3). Auch die regelbasierte Ableitung des Arbeitsplans auf Basis der mit einem Konfigurator erzeugten Produktvariante ist ein möglicher Weg. Der Arbeitsplan enthält alle zur Montage der jeweiligen Variante des Produkts erforderlichen Schritte und eine Information, durch welche Ressource sie ausgeführt werden können bzw. sollen. Es ist möglich, dass nur eine Ressource dafür in Frage kommt, es können auch mehrere sein. In diesem Fall ist die bevorzugte (Default) deklariert. Da bisher kein für diese Zwecke geeignetes Datenmodell und Beschreibungsformat existierte, wurde im Rahmen dieser Arbeit „CollabML“ entwickelt, ein einfaches XML-Format zur Beschreibung kollaborativer Montageabläufe. Aufgrund der XML-basierten Form ist es einerseits bei Bedarf in AutomationML oder ähnliche Containerformate integrierbar, andererseits aber auch selbst für Erweiterungen offen, zum Beispiel zur Berücksichtigung spezifischer Parameter für einzelne Ressourcen. Insbesondere die für die jeweilige Ressource zutreffende Beschreibung der Aufgabe ist hier ausdrücklich nicht festgelegt, um die Offenheit und Erweiterbarkeit für zusätzliche Ressourcen zu gewährleisten. Gleichzeitig ist gewährleistet, dass der Arbeitsplan maschinenlesbar ist. Verschiedene Methoden zur Erzeugung des Arbeitsplans und insbesondere der Zuordnung der Ressourcen bei der kollaborativen Montage stellt Blankemeyer u. a. (2019) gegenüber.

Eine CollabML-Datei enthält genau einen Montageauftrag, der zur Fertigstellung eines einzelnen Produkts führt. Der gesamte Auftrag besteht aus einer oder mehreren Aufgaben, die wiederum von einer oder mehreren Ressourcen ausgeführt werden können. Dieses grundlegende Datenmodell ist zusammenfassend in Abbildung 4.10 dargestellt, die jedoch insofern nicht vollständig ist, dass die Teile des Modells zur konkreten Beschreibung der Aufgabe nicht enthalten sind, sondern nur die für die im Folgenden beschriebene Steuerung relevanten. Dazu gehört neben eindeutigen IDs aller Entitäten insbesondere zu jeder Aufgabe die Liste aller Aufgaben, die erledigt sein müssen, bevor mit der Aufgabe selbst begonnen werden kann. Die eigentliche Beschreibung der zur Durchführung der Aufgabe erforderlichen Schritte ist abhängig von der Ressource, so dass deren Feld „taskDescription“ hier als Platzhalter für ein weiteres geeignetes Format steht. Dieses kann im Fall der Ressource Cobot ein Roboterprogramm sein, im Falle der Ressource Werker eine Beschreibung in Text und Bild, z. B. PDF, HTML, etc.

Eine Definition von CollabML im XSD-Format und ein Beispiel dazu befinden sich im Anhang A.2 auf Seite 159. Die entsprechende schrittweise –teilweise parallele– Ausführung dieses Beispiels zeigt Abbildung 4.11.

Ein möglicher Ablauf der Montage nach diesem Beispiel-Arbeitsplan könnte wie folgt ablaufen: Die erste Aufgabe („Pick & Place part 378“) könnte nach dem Arbeitsplan sowohl vom Werker als auch vom Cobot erledigt werden. Als Standardressource ist der Cobot festgelegt, der also die Ausführung beginnt. Der Werker stellt inzwischen fest, dass er schon die nächste Aufgabe übernehmen könnte, für die standardmäßig zwar auch der Cobot vorgesehen ist, aber die auch der Werker übernehmen kann. Diese Entscheidung steuert er über das am Control Wrapper (s.u.) angeschlossene HMI. Mit Hilfe des „<waitForTasks>“-Tags ist in diesem Beispiel festgelegt, dass mit der Ausführung von Aufgabe 3 erst begonnen werden kann, wenn die Aufgaben 1 und 2 abgeschlossen sind. Und Aufgabe 3 kann auch nur vom Werker erledigt werden. Ebenso kann auch Aufgabe 4 erst nach Abschluss von Auf-

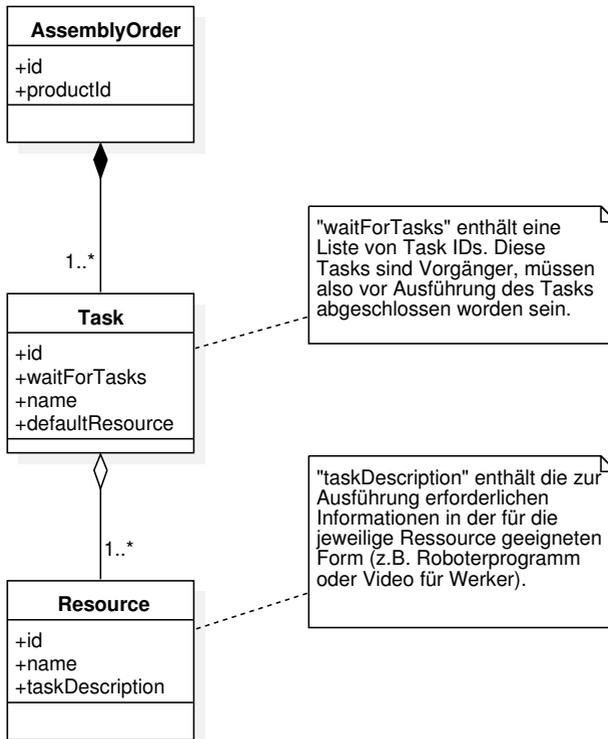


Abbildung 4.10: Vereinfachtes grundlegendes Datenmodell für CollabML zur Beschreibung kollaborativer Arbeitspläne.

gabe 3 begonnen werden, deren Ausführung der Werker in diesem Beispiel dem Cobot überlässt. Damit ist die Ausführung dieses Beispiel-Arbeitsplans abgeschlossen. Die einzelnen referenzierten XML-Dateien mit den Instruktionen für die einzelnen Aufgaben sind hier nicht wiedergegeben. Sie sind individuell auf die jeweilige Ressource anzupassen.

Bei der Gestaltung und Ausführung des kollaborativen Arbeitsplans wird von mehreren Voraussetzungen ausgegangen:

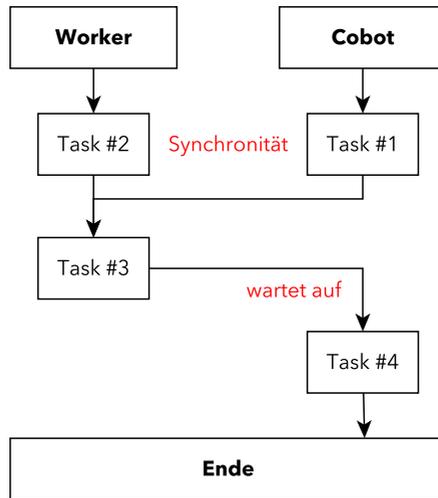


Abbildung 4.11: Beispielhafter möglicher Ablauf einer Montage nach dem in CollabML formulierten Arbeitsplan (s. a. Anhang A.2).

- Jede Aufgabe muss von mindestens einem der vorhandenen Assets ausführbar sein, da ansonsten eine Blockierung eintreten würde.
- Es gibt Aufgaben, die nur vom Werker oder nur vom Roboter (allgemeiner nur von einer einzigen Ressource) erledigt werden können.
- Es kann aber auch Aufgaben geben, die sowohl vom Roboter als auch vom Werker (allgemeiner von mehreren Ressourcen) ausgeführt werden können. In diesem Fall ist festgelegt, wer die Aufgabe im Normalfall („Default“) erledigen soll.
- Der Werker kann bei Aufgaben, für die mehrere mögliche Ausführer deklariert sind, entscheiden, wer die Aufgabe tatsächlich übernimmt.

Gerade der letzte Punkt ist in der Literatur nicht unumstritten, da letztlich die Frage dahintersteht, ob der Mensch bei der Montage die führende Rolle übernimmt oder nicht. Hier sind nicht nur technische, sondern auch weitere Aspekte wie zum Beispiel die organisatorische Effizienz oder die Mitarbeiter-Compliance zu beachten bis hin zu philosophischen und ethischen Überlegungen.

Zentrale Instanz der Steuerung der kollaborativen Zelle ist die in den Manufacturing Integration Bus integrierte „Control Engine“. Ihre Aufgabe ist die schrittweise Abarbeitung des Arbeitsplans und der Transfer der Details einer Aufgabe über den mit ihr verbundenen OPC-UA-Client an den OPC-UA-Server der Montagezelle (siehe auch Abbildung 4.12). Dazu wird eine OPC-UA-Methode auf dem Server aufgerufen, die das die Details enthaltende XML-Snippet als Eingabeparameter akzeptiert. Dieser Ansatz adressiert die mit Teilforschungsfrage **F3** in Zusammenhang stehenden Anforderungen.

Gegenstück der Control Engine im Manufacturing Integration Bus ist der „Control Wrapper“, der die Details einer Aufgabe vom angegliederten OPC-UA-Server entgegennimmt. Die in der Zelle zur Verfügung stehenden Assets sind im angebotenen OPC-UA-Server als Knoten modelliert und ihr jeweiliger Status, insbesondere die Unterscheidung zwischen „beschäftigt“ und „nicht beschäftigt“, steht damit dem OPC-UA-Client der Control Engine zur Verfügung. Die einzelnen Aufgaben sind durch eine eindeutige Nummerierung (IDs) voneinander zu unterscheiden und der Control Wrapper stellt über einen weiteren Knoten die Liste aller bereits erledigten Aufgaben bereit. Es gibt bei der Montage natürlich Aufgaben, die erst erledigt werden können, nachdem andere erledigt wurden und die durch entsprechende Definition des „waitFor“-Feldes (Liste) in CollabML konfiguriert worden sind. Ist eine Ressource frei und sind alle Voraussetzungen (Vorgänger) erfüllt, sendet die Control Engine das die Aufgabe beschreibende Snippet („taskDescription“) an den Control Wrapper.

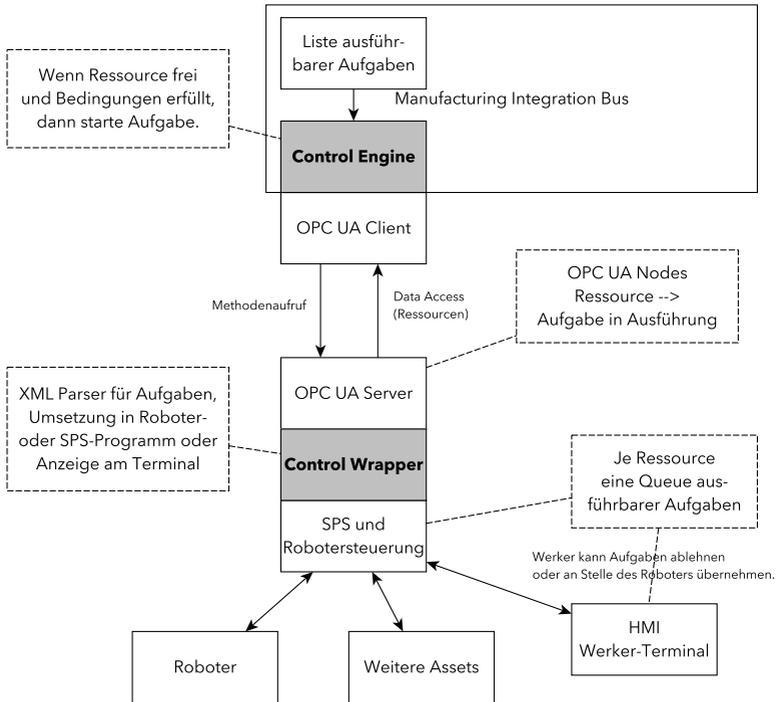


Abbildung 4.12: Überblicksdarstellung zur Steuerung kollaborativer Arbeitsschritte durch die Control Engine des Manufacturing Integration Bus.

Dieser führt für jede Ressource eine Queue der zu erledigenden Aufgaben, die auch dem Werker über ein Display angezeigt werden. Für Aufgaben, die von mehreren Ressourcen erledigt werden könnten, kann der Werker selbständig Verschiebungen vornehmen und Aufgaben anderen Ressourcen zuordnen. Die Logik des Control Wrappers verhindert dabei Veränderungen, die zu Blockierungen führen könnten, indem regelbasiert die Integrität des Arbeitsplans überprüft wird. Damit wird beispielsweise verhindert, dass der Werker Aufgaben übernimmt, die nur der Roboter übernehmen soll. Diese manuellen Eingriffe durch den Werker sind jedoch optional und ohne sie steu-

ert die Control Engine die Abläufe im klassischen Sinne analog einer voll automatisierten Montage. Eine weitere zentrale Aufgabe des Control Wrappers besteht in der Umsetzung der Aufgabe in die jeweilige Sprache der angesteuerten Ressource. Die Schnittstelle zwischen etabliertem Standard (OPC UA) und erforderlicher individueller Anpassung an die vorhandenen Ressourcen erfolgt durch den Control Wrapper, der für die Adaption und Verteilung an die verschiedenen Ressourcen sorgt. Dies kann im Fall von Informationen für den Werker die Anzeige eines Textdokuments, von Bildern oder Videos oder auch eine Sprachausgabe am HMI sein. Bei einem Roboter als Ressource wird es sich in den meisten Fällen um ein in der Robotersteuerung ausführbares Programm handeln, das entweder auf den jeweiligen Robotertyp zugeschnitten oder in einer allgemeineren Form (Bahnparameter etc.) dargestellt ist und interpretiert wird.

Die auf diese Art und Weise durch CollabML und die oben beschriebene Steuerungslogik mit OPC UA als grundlegendem Standard realisierte Ansteuerung einer kollaborativen Zelle ermöglicht einerseits eine direkte Ansteuerung einzelner Ressourcen und einen automatisierten Ablauf. Andererseits erlaubt sie dem Werker einen gewissen Rahmen für individuelle Eingriffe in den Ablauf, deren Notwendigkeit sich erst bei der tatsächlichen Ausführung zeigt und die zum Zeitpunkt der Erstellung des Arbeitsplans noch nicht erkennbar waren.

Die herkömmliche Vollautomatisierung ist letztlich ein Spezialfall der hier vorgestellten Steuerungslogik, die durch Konfiguration einer einzigen Ressource pro Aufgabe in Verbindung mit den zeitlichen Abhängigkeiten und bei Wegfall des möglichen Eingriffs innerhalb der Montagezelle selbst nachgebildet werden könnte. Die Erweiterungen betreffen also hauptsächlich die Möglichkeit mehrerer in Frage kommender Ressourcen pro Aufgabe und die optionale Einflussnahme im Shopfloor.

Zusätzlich bleibt noch einmal hervorzuheben, dass diese Art und Weise der Steuerung zwei verschiedene Optionen unterstützt: die zentrale Steuerung vom Manufacturing Integration Bus aus, auf die innerhalb der kollaborativen Zelle nicht weiter Einfluss genommen werden kann, und die dezentrale Steuerung, die einen Arbeitsplan an die Zelle übermittelt und die weiteren Details der Ausführung offen lässt. Im ersten Fall werden die einzelnen Assets unmittelbar vom Manufacturing Integration Bus angesteuert, im zweiten Fall ist in der Zelle selbst ein Dispatcher (als Bestandteil des Control Wrappers) für die Zuweisung der einzelnen Aufgaben zuständig. Der Werker könnte über sein Terminal beispielsweise eine Aufgabe übernehmen, die eigentlich dem Cobot zugewiesen war.

Auch die Steuerung geschieht hier ausschließlich über OPC UA. Mit der 2019 veröffentlichten OPC UA Companion Specification Robotic (VDMA 40010-1) steht zwar grundsätzlich ein Datenmodell auch für die Roboter-Anbindung zur Verfügung, dieses zielt aber ausschließlich auf die Darstellung von Zuständen ab. Für die eigentliche Ansteuerung eines Roboters muss also ein eigenes Datenmodell implementiert werden, das die Skills des jeweiligen Roboters berücksichtigt. Für die Validierung wurde ein (bisher unveröffentlichtes) allgemeines Datenmodell des WZL der RWTH Aachen verwendet, das für die gängigen Leichtbauroboter anwendbar ist.

4.6 Persistierung von Prozessdaten

Während der kollaborativen Montage entstehen in Echtzeit zahlreiche Daten an den verschiedenen Teilen der Anlage. Im Sinne des in Abschnitt 4.3 beschriebenen Zyklus sollen diese auf verschiedenen zeitlichen Ebenen (siehe Tabelle 4.1) genutzt werden, um die Montage zu optimieren, Fehler zu beheben und neue Produktvarianten besser planen zu können. Dieser Teil der

Methodik bezieht sich auf die Teilforschungsfrage **F4** (siehe Abschnitt 1.3 auf Seite 9).

Der Begriff „Echtzeit“ wird hier verwendet für eine Form der Verarbeitung, bei der zwischen der Entstehung der Prozessdaten und deren Verfügbarkeit zur Auswertung durch einen Bediener oder Monitoring-Systeme typischerweise nicht mehr Zeit als etwa eine Sekunde vergeht. Eine noch kürzer getaktete Verarbeitung ist im Rahmen der hier beschriebenen Methodik nicht erforderlich. In anderen Anwendungsszenarien könnte diese natürlich erforderlich und sinnvoll sein, zum Beispiel bei einer Erweiterung auf eine Echtzeit-Simulation.

Die Kommunikation zwischen der kollaborativen Zelle selbst und dem übergeordneten, in Abschnitt 4.2 beschriebenen, Manufacturing Integration Bus erfolgt ausschließlich über OPC UA (siehe auch Unterabschnitt 2.4.2). Dies bietet zahlreiche Vorteile: es muss nur ein Übertragungsweg hergestellt werden, Sicherheitsfragen sind bereits gelöst und alle weiteren Vorteile der Nutzung von OPC UA kommen zum Tragen. Dies gilt sowohl für die zur Steue-

Tabelle 4.1: Zeitebenen bei der Verwertung von Prozessdaten

Echtzeit-Monitoring	Prozessdaten stehen unmittelbar <i>während</i> der laufenden Montage zur Auswertung durch den Werker an der Anlage oder auch automatisierte Monitoring-Instrumente zur Verfügung.
Aggregiert in Echtzeit	Wie beim Echtzeit-Monitoring stehen die Daten unmittelbar zur Verfügung, werden aber aggregiert mit zuvor persistierten Daten dargestellt und ausgewertet.
Analyse nach der Montage	Die Prozessdaten werden <i>nach</i> Abschluss der Montage ausgewertet und gewonnene Erkenntnisse in spätere Montage-Abläufen berücksichtigt.

ung (siehe auch Abschnitt 4.5) erforderliche Datenübertragung als auch für die Verwertung der Prozessdaten für Monitoring und Analyse.

Eine kollaborative Zelle beinhaltet im Allgemeinen mehrere Systeme, die die verschiedenen Komponenten steuern, z. B. einen oder mehrere Roboter, einzelne Werkzeuge wie Greifer oder Schrauber, oder auch weitere Elemente, die durch eine oder mehrere SPS angebunden sind. Auf diese Systeme ist für die Steuerung ein schreibender Zugriff erforderlich und lesend werden Prozessdaten zugänglich. Die Anbindung an den Manufacturing Integration Bus kann erheblich erleichtert und vereinfacht werden durch Aggregation des OPC-UA-Zugriffs auf alle beteiligten Komponenten wie in Abbildung 4.13 dargestellt.

Die einzelnen Komponenten wie SPS, Robotersteuerung, Werkzeugsteuerung oder weitere vergleichbare Systeme haben dabei jeweils einen eigenen OPC-UA-Server. Dieser kann in die Hard- und Software der Komponenten vom Hersteller derselben bereits integriert sein oder auch zusätzlich installiert werden, wenn noch nicht vorhanden. Diese Architektur der von den Herstellern in SPS und andere Komponenten bereits integrierten OPC-UA-Server ist der Hauptgrund für die Existenz mehrerer Server innerhalb der Zelle. Der in der Abbildung 4.13 zentral dargestellte Aggregierungsserver bildet nach außerhalb der kollaborativen Zelle eine einheitliche Schnittstelle und spricht nach innen die einzelnen Komponenten an. In den zur Validierung verwendeten Implementierungen wurde dazu ein transparenter Aggregierungsserver verwendet, der von außerhalb der Zelle kommende Requests weiterleitet und die Response der angebotenen OPC-UA-Server wieder zurückgibt. Es gibt nur wenige entsprechende Produkte am Markt und diese haben teilweise auch einen anderen Fokus, so dass die Aggregation eher eine Nebenfunktion darstellt. Es ist jedoch mit moderatem Aufwand möglich,

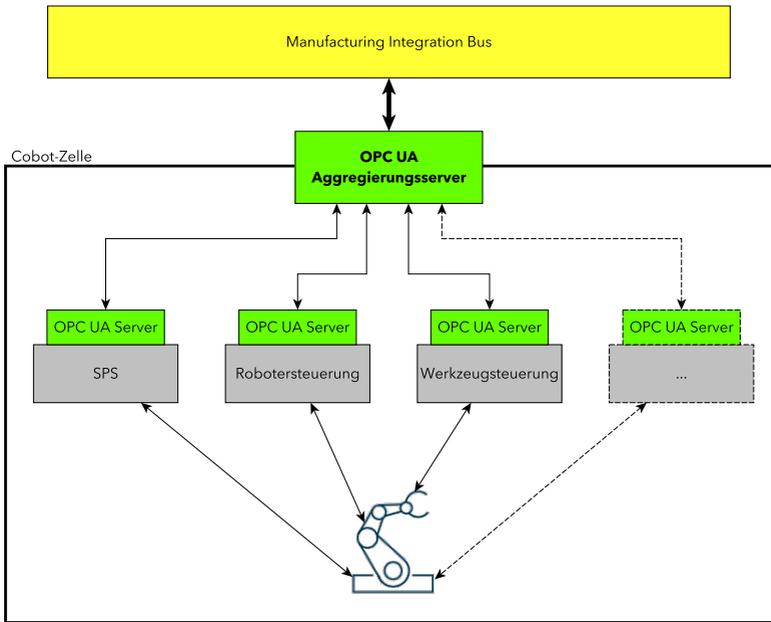


Abbildung 4.13: Einheitlicher Zugang zur Cobot-Zelle für die Steuerung und den Zugriff auf Prozessdaten durch Aggregation aller Komponenten über einen OPC UA Aggregierungsserver.

auf Basis eines Frameworks wie Eclipse Milo² einen eigenen transparenten OPC-UA-Aggregierungsserver zu implementieren.

Die hier beschriebene Methodik basiert unter anderem auf der konsequenten Nutzung von OPC UA als Kommunikationsgrundlage zwischen Manufacturing Integration Bus und kollaborativer Zelle. Zum Zweck der Speicherung von Prozessdaten ist daher ein OPC-UA-Logger erforderlich, der permanent Änderungen an den Werten der beobachteten OPC-UA-Knoten in eine Datenbank protokolliert. Für die zu Testzwecken und die Validierung verwendeten Anwendungsfälle wurde ein solcher auf Basis von Eclipse Milo implemen-

²<https://projects.eclipse.org/projects/iot.milo>

tiert. Die Entwicklung dieses OPC-UA-Loggers steht eng in Zusammenhang mit der Beantwortung der Teilforschungsfrage **F4**.

Fast alle im Betrieb befindlichen OPC-UA-Server, oft von Herstellern aktueller Komponenten bereits „mitgeliefert“, wie zum Beispiel der Beckhoff SPS, werden im „Data Access“ Modus betrieben. Das heißt jeder Knoten hat genau einen Wert, nämlich den aktuellen. Ändert sich dieser, wird der vorherige Wert überschrieben und steht nicht mehr zur Verfügung. Dies ist der Grund und die Notwendigkeit zur Nutzung eines OPC-UA-Loggers, der die Prozessdaten zur späteren Verwendung persistiert.

Einen Überblick über die möglichen OPC-UA-Datenflüsse gibt Abbildung 4.14, die auch vergrößert im Anhang zu finden ist und auf die unten zurückgekommen wird. In der linken oberen Ecke der Abbildung ist die Kollaborative Zelle, in der die Prozessdaten entstehen und über den in der Mitte der oberen Reihe dargestellten OPC-UA-Server im Modus Data Access zur Verfügung gestellt werden, auf den sich OPC-UA-Clients (mit den entsprechenden Berechtigungen) verbinden können.

Der OPC-UA-Logger stellt einen solchen Client dar, der per Konfiguration die relevanten Knoten des (aggregierten) OPC-UA-Servers an der Zelle beobachtet. Dieser ist weiterhin mit einer relationalen Datenbank verbunden, in deren Tabellen die Änderungen der Werte geschrieben werden können. Kernfunktionalität des OPC-UA-Loggers ist, bei jeder Änderung an einem der angebotenen Knoten des OPC-UA-Servers an der Zelle, diesen neuen Wert zusammen mit der Serverzeit in die Datenbank zu schreiben. Dabei gibt es –zumindest prinzipiell– keine Taktung und kein Polling, sondern nur bei Änderung eines Werts erfolgt ein neuer Eintrag in die Datenbanktabelle. Je nach Art des in der kollaborativen Zelle stattfindenden Montageprozesses und der angebotenen Sensoren und Assets kann die resultierende Datenmenge sehr gering oder auch sehr groß sein und im Extremfall auch die Einsatzgrenzen

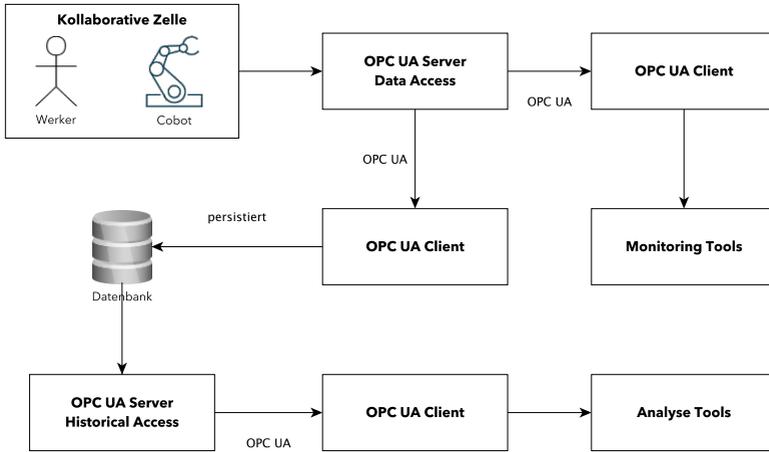


Abbildung 4.14: Datenfluss zur Persistierung von Prozessdaten mit angeschlossenem Monitoring und Analyse auf Basis von OPC UA. Vergrößerung in Abbildung A.4 auf Seite 155.

eines RDBMs überschreiten. In diesem Fall könnten Techniken aus dem Bereich des Datastream Processing angewandt werden, was jedoch bei den im Rahmen dieser Arbeit implementierten Systemen nicht erforderlich war.

Auch technischer Sicht besteht keine Notwendigkeit einer räumlichen Nähe zwischen Kollaborativer Zelle und Prozessdatenspeicher, da der OPC-UA-Standard alle erforderlichen sicherheitsbezogenen Fähigkeiten bereits beinhaltet. Sowohl die Authentifizierung und die Vertraulichkeit, aber auch die Integrität können in einfacher Weise implementiert werden. So spricht aus technischer Sicht auch nichts gegen die Persistierung der Prozessdaten in Cloud-Lösungen, die als separates Produkt angeboten werden könnten. Voraussetzung ist natürlich die Anbindung aller relevanten Datenquellen an den OPC-UA-Server der Zelle selbst.

Sind die historischen Werte erst einmal in der Datenbank gesichert, gibt es mehrere Wege, diese wieder nutzbar zu machen. Ein naheliegender Weg ist

der direkte Zugriff von Monitoring- oder Analyse-Werkzeugen auf die Datenbank selbst. Eine Alternative dazu stellt die Bereitstellung historischer Daten auf Basis des OPC UA „Historical Access“ Modes dar, der in Teil 11 der OPC UA Spezifikation beschrieben ist (OPC Foundation 2015). Dieser Fall ist in Abbildung 4.14 links unten dargestellt und setzt die Implementierung eines weiteren OPC-UA-Servers voraus, der allerdings im Modus „Historical Access“ betrieben wird. Wesentliches Merkmal einer Abfrage dieser Servers ist neben dem Namen des Knotens ein zeitliches Intervall, in dem die zurückgegebenen Werte liegen sollen. Somit stellt der OPC UA Historical Access Server eine standardisierte Schnittstelle zur sicheren Bereitstellung historischer Prozessdaten dar.

Eine weitere Möglichkeit bietet dieses Logging für in den Montageprozess integrierte Prüfungen, deren Ergebnisse auf diesem Weg einfach und standardkonform gesichert und in Monitoring und Analyse verwendet werden können.

Die hier beschriebene Teilmethodik zur Persistierung der Prozessdaten kollaborativer Montagesysteme beantwortet die Teilforschungsfrage **F4**.

4.7 Monitoring und Analyse kollaborativer Prozesse

In den meisten Fällen ist innerhalb der kollaborativen Zelle der Mensch derjenige, der aufgrund seiner großen Flexibilität die Kontrolle über das Geschehen ausübt und bei Abweichungen vom geplanten Ablauf eingreifen muss. Dazu benötigt er aktuelle Informationen über den Zustand aller Komponenten der Zelle. An seinem Werker-Terminal (als HMI) sollen ihm daher Informationen zum Ablauf und aktuellen Zustand der Montage in schnell erfassbarer und übersichtlicher Art und Weise zugänglich sein. Dies ermöglicht ein (Condition) Monitoring der kollaborativen Montage, das in diesem

Kapitel näher beschrieben werden soll. In der Literatur findet man dazu einige Ansätze (Pethig, Niggemann und Walter 2017), die aber nicht auf die besonderen Bedingungen der kollaborativen Montage eingehen.

Die Grundlage für das Monitoring bilden die in den vorhergehenden Kapiteln beschriebenen Methoden zur Erfassung und Persistierung der Prozessdaten. Prinzipiell könnte ein Monitoring nur auf den jeweils aktuellen Zustandswerten aus der Zelle aufgebaut sein. Nimmt man aber Daten aus einer kurzen gerade vergangenen Zeitspanne hinzu, erreicht man eine größere Informationstiefe, z. B. bei der Entdeckung von Trends. Weiterhin können auf Basis der hier vorgestellten Weise der Beschreibung und Steuerung der kollaborativen Zelle auch deren Struktur und die Informationen aus der Simulation hinzugezogen werden, um noch aussagekräftigere Parameter für das Monitoring zu generieren. Einige Beispiele dazu werden weiter unten gegeben. Der Fluss der Prozessdaten auf Basis von OPC UA für Zwecke des Monitoring ist in Abbildung 4.14 auf Seite 104 zusammengefasst. Eine praxisnahe Alternative ist die Anbindung direkt an die Datenbank (in der Abbildung Mitte links).

Neben allgemeinen Parametern gibt es einige spezifische, die unter dem Aspekt der Kollaboration und in Verbindung mit der durch die Simulation entstandenen Planung von besonderem Interesse sind. Dies sind unter anderem:

Zustände

Der Zustand der gesamten Cobot-Zelle, aber auch der Zustand einzelner Komponenten, z.B. Roboter oder Greifer, kann ein simpler Hinweis auf Abweichungen vom geplanten Ablauf sein. Sinnvolle Werte können Zustandsbeschreibungen wie z. B. „waiting“ oder „busy“ sein. Auch der Vergleich mit den im Arbeitsplan aus der Simulation festgelegten Zuständen ist von Interes-

se, da Abweichungen von den Ergebnissen der Simulation ein unmittelbares Eingreifen des Werkers erforderlich machen kann.

Durchlaufzeiten

Ein Ergebnis der Simulation ist die erwartete Bearbeitungszeit pro Aufgabe. Hier bietet sich ein Vergleich mit der tatsächlich aktuell verstrichenen Bearbeitungszeit an.

$$\Delta t = t_{sim} - t_{act}$$

mit t_{sim} = Bearbeitungszeit gemäß Simulation

t_{act} = tatsächlich verstrichene Bearbeitungszeit

Positive Werte können als Normalfall betrachtet werden, negative Werte ab einem gewissen Schwellenwert können auf Probleme hinweisen. Dies kann näher quantifiziert werden durch Einführung eines Toleranzkoeffizienten:

$$t_{lim} = t_{sim} \cdot c_t - t_{act}$$

mit t_{sim} = Bearbeitungszeit gemäß Simulation

t_{act} = tatsächlich verstrichene Bearbeitungszeit

c_t = Toleranzkoeffizient (z. B. 1,3)

Wird t_{lim} negativ, kann dies als Indikator für Abweichungen verwendet und ggf. ein Alarm ausgelöst werden.

Aufteilung zwischen Roboter und Mensch

Der jeweils vom Cobot und vom Werker übernommene Anteil der Aufgaben kann im Verhältnis zueinander ebenfalls aussagekräftig sein, insbesondere im Vergleich mit den diesbezüglichen Ergebnissen der Simulation. Zunächst

kann die Differenz zwischen bis zum jeweiligen Arbeitsschritt geplanten und tatsächlich ausgeführten Aufgaben (Anzahl), sowohl für den Cobot als auch für den Werker, berechnet werden:

$$\Delta n = n_{sim} - n_{act}$$

mit n_{sim} = Anzahl Aufgaben laut Simulation

n_{act} = tatsächlich durchgeführte Aufgaben

Darauf basierend und ebenfalls mit einem angemessen definierten Toleranzkoeffizienten versehen, können Abweichungen schnell erkannt werden.

Ergebnisse von Prüfungen

Beinhaltet die Cobot-Zelle auch Prüfeinrichtungen, kann das Ergebnis der Prüfung dem Werker direkt angezeigt werden, so dass er unter Umständen Zusammenhänge erkennt, die zu einer unmittelbaren Änderung der Ausführungsplanung führen müssten.

Trends

Bei wiederholter Ausführung einer Aufgabe, zum Beispiel bei Bearbeitung eines Auftrags mit einer Stückzahl größer als etwa 10, können Trends der oben beschriebenen und weiterer Werte angezeigt werden. Steigende Bearbeitungszeiten zum Beispiel können auf Probleme an der Anlage oder auch Ermüdung des Werkers hinweisen.

Die Auflistung dieser Parameter ist nur exemplarisch zu verstehen, da im jeweiligen konkreten Anwendungsfall im Allgemeinen zahlreiche weitere hinzukommen werden. Mit diesem Ansatz wird eine Annäherung an die Antwort auf Teilforschungsfrage **F5** angestrebt.

Die Darstellung aller für das Monitoring in der Cobot-Zelle relevanten Werte erfolgt über ein grafisch sinnvoll aufbereitetes Dashboard durch intuitive Grafiken mit assoziativen Farben. Dieses wird dem Werker an seinem Terminal angezeigt und soll ihm ermöglichen, den aktuellen Zustand aller Komponenten und des gesamten Arbeitsablaufs schnell und einfach zu erfassen und Abweichungen zu erkennen.

Während das Monitoring sich einerseits auf sehr aktuelle Prozessdaten beschränkt und andererseits auch die Möglichkeit der sofortigen Reaktion zum Ziel hat, ist die ausführlichere Analyse der aufgezeichneten Prozessdaten und die Umsetzung der daraus gezogenen Schlussfolgerungen eine Engineering-Aufgabe (siehe auch Abbildung 4.15).

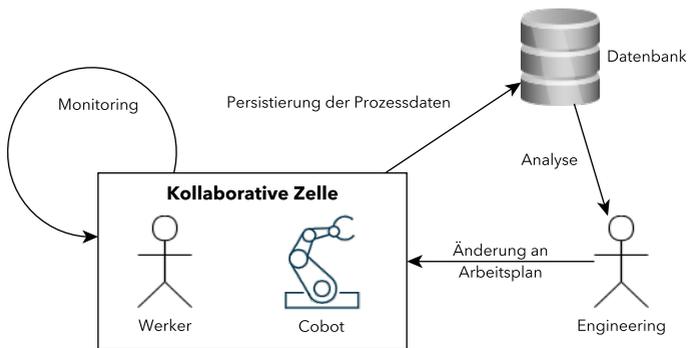


Abbildung 4.15: Unterschied zwischen Monitoring und Analyse bei der kollaborativen Montage.

Die zeitliche Skala des Monitoring bewegt sich innerhalb der Montage einer einzelnen Produktinstanz oder maximal innerhalb eines Auftrags. Die Analyse erlaubt einen größeren Zeithorizont über mehrere Aufträge oder noch längere Zeiträume. Durch die damit entstehenden größeren Stichprobenumfänge und längeren Zeitreihen wird die Anwendung fortgeschrittener

statistischer Methoden der deskriptiven Statistik und der Zeitreihenanalyse möglich.

Einen umfassenden Überblick über Verfahren zur statistischen Analyse von industriellen Prozessdaten (wie z. B. die Hauptkomponentenanalyse und andere) gibt S. Yin u. a. (2014).

Die in diesem Kapitel beschriebenen Verfahren beantworten die Teilforschungsfrage **F5** nach der Überwachung der Prozessdaten während der kollaborativen Montage und die Teilforschungsfrage **F6** nach der Analyse der Prozessdaten im Hinblick auf weitere Engineering-Zyklen.

4.8 Zusammenfassung

Die in diesem Kapitel vorgestellte Methodik für das Informationsmanagement bei der kollaborativen Montage variantenreicher Produkte besteht aus mehreren Teilen, deren verbindendes Element und „Rückgrat“ der Manufacturing Integration Bus (MIB) ist. Er integriert die heterogenen Datenflüsse und -formate und speichert alle Daten zentral. Der MIB erhält Daten von Standardsystemen wie dem ERP oder dem PDM, stellt die Verbindung zur Simulation dar, steuert die Montage in der Cobot-Zelle und verarbeitet die Prozessdaten.

Produkt und Anlage durchlaufen von ihrer Entstehung bis zu ihrer Entsorgung einen jeweils eigenen Lebenszyklus. Im Schnittpunkt findet die Montage des Produkts statt. Die Anlage ist zu einer Rekonfiguration in der Lage und so kann auch jeder einzelne Montagevorgang eine Grundlage für weitere Montagevorgänge werden. Durch die möglichst vollständige virtuelle Abbildung der Anlage in AutomationML entsteht der Digitale Zwilling. Er bildet die Grundlage für die Simulation eines Montagevorgangs, die die Sicherheit

des Werkers und der Anlage erhöht und wiederum Basis für die Generierung des detaillierten Arbeitsplans ist.

Eine weitere Aufgabe des MIB ist die Steuerung der kollaborativen Montage, entweder zentral oder auch dezentral mit Einflussmöglichkeiten innerhalb der Cobot-Zelle. Diese vollständig über OPC UA abgebildeten Steuerungsabläufe basieren auf dem Ergebnis der Simulation, insbesondere den Roboterbahnparametern und erwarteten Werten, z. B. den Durchlaufzeiten. Die bei der Montage beobachteten Prozessdaten, ebenfalls ausschließlich per OPC UA übertragen, persistiert der MIB und stellt sie für Monitoring- und Analysezwecke zur Verfügung. Das kurzfristige Monitoring ermöglicht Eingriffe in laufende Montageprozesse bei unerwartetem Verhalten einer der Komponenten und die langfristige Analyse von Prozessdaten über mehrere Montagevorgänge oder Aufträge hinweg bildet die Grundlage für die Optimierung der Montage im Engineering.

5 Validierung

Im vorherigen Kapitel 4 wurde eine Methodik für das Wissens- und Prozessmanagement bei der kollaborativen Montage variantenreicher Produkte vorgestellt. Mit dem Manufacturing Integration Bus im Zentrum und Methoden für die Verbindung zur Simulation, die Steuerung der kollaborativen Zelle, das Monitoring, die Persistierung von Prozessdaten und die Auswertung der Prozessdaten bildet sie eine Grundlage für den Aufbau und Betrieb kollaborativer Montagesysteme.

Die Gesamtmethodik soll in diesem Kapitel validiert werden. Dazu wird in Abschnitt 5.1 zunächst die Problemstellung erneut aufgegriffen und die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Validierung näher erläutert.

Dann werden in den Abschnitten 5.2 bis 5.4 insgesamt drei Anwendungsfälle vom Minimal-Demonstrator bis zur Anwendung an einer industriellen Anlage vorgestellt.

5.1 Vorgehensweise zur Validierung

Während der Entwicklung der in Kapitel 4 beschriebenen Methodik wurden mehrere voneinander verschiedene Testfälle implementiert, die ein breites Spektrum an Tests ermöglichen, die wiederum zur Weiterentwicklung der Methodik beigetragen haben. Zusätzlich wurde die bereits auf diesem Weg erarbeitete Methodik in einem industriellen Anwendungsfall implementiert.

Zur Validierung wird eine Methodik auf ihre Eignung hin geprüft, ob sie die vorgesehenen Ziele erreicht, und „die Bestätigung durch objektiven Nachweis erbracht, dass die Anforderungen für eine bestimmte Anwendung oder einen bestimmten Gebrauch erfüllt sind“ (ISO 9000).

Das Ziel dieser Arbeit ist die Bereitstellung eines an die kollaborative Montage variantenreicher Produkte angepassten Informationsmanagements. Die hier vorgestellte Methodik ist grundsätzlich im Rahmen der beschriebenen Anwendungsbereiche und Grenzen allgemeingültig und kann daher in den verschiedensten Szenarien kollaborativer Montage zum Einsatz kommen.

Eine Fallstudie definiert Schramm (1971) cit. in R. K. Yin (2018) so:

„The essence of a case study, the central tendency among all types of case study, is that it tries to illuminate a decision or set of decisions: why they were taken, how they were implemented, and with what result.“

In diesem Sinne folgt die Betrachtung von drei verschiedenen Fällen, in denen jeweils Teilbereiche der Methodik implementiert und auf ihre Eignung hin getestet wurden.

Aus verschiedenen Gründen (zeitliche Beschränkungen, Simulationsaufwand, etc.) konnten nicht alle Teilbereiche der Methodik an allen drei Fallbeispielen erprobt werden (siehe auch Tabelle 5.1). Daher wird in den folgenden Kapiteln nicht bei allen Fallbeispielen auf alle Aspekte eingegangen.

5.2 Demonstrator mit minimalem Funktionsumfang

Als einfache und unkomplizierte Methode zum Testen einzelner Teile der gesamten Methodik für das Informationsmanagement bei der kollaborativen

Tabelle 5.1: Implementierte Teile der Methodik in den unterschiedlichen Fallbeispielen

	Minimal-Demonstrator	Erweiterter Demonstrator	Industrielle Anlage
Manufacturing Integration Bus	–	✓	✓
Digitaler Zwilling	–	✓	✓
Anbindung Simulation	–	✓	✓
Steuerung	✓	✓	✓
Persistierung	✓	✓	–
Monitoring	✓	–	–
Analyse	✓	–	–

Montage hat sich ein Miniatur-Demonstrator mit minimalem Funktionsumfang erwiesen, dessen Aufbau und Funktionsweise in diesem Kapitel näher beschrieben werden soll. Er dient als Laborumgebung zur Veranschaulichung der Abläufe der kollaborativen Montage auf eine stark vereinfachte und auf das Minimum reduzierte Art und Weise (Schneider 2019).

Einen Gesamtüberblick des Minimal-Demonstrators gibt die Abbildung 5.1. In der oberen Hälfte ist der 2-Achs-Roboter erkennbar, der auf der Grundplatte fixiert ist. Er entspricht modellhaft einem Leichtbaurobter (wie z. B. dem Universal Robots UR 5 oder dem Kuka iiwa) an einem industriellen kollaborativen Arbeitsplatz, wenn auch mit reduzierter Anzahl an Achsen. In der unteren Hälfte des Bildes sind mehrere Ablageplätze für das Modell-Werkstück, einige Lichtschranken und ein Minimal-HMI in Form einiger Signallampen und eines Tasters sichtbar.

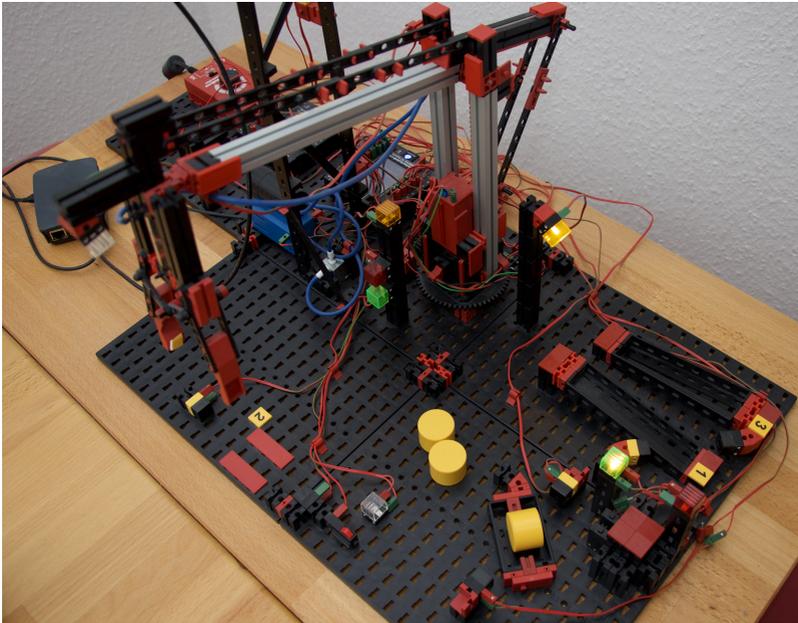


Abbildung 5.1: Gesamtüberblick über den Fischertechnik Minimal-Demonstrator zur Veranschaulichung kollaborativer Montage. Vergrößerung in Abbildung A.5 auf Seite 156.

An Ende des Roboterarms befindet sich ein pneumatischer Greifer, der Kompressor und die übrigen Teile der Pneumatik sind blau und daher leicht auffindbar.

Gesteuert werden die einzelnen Komponenten einschließlich Roboter und Greifer über Fischertechnik Robotics TXT Controller, die in ihrer Funktionsweise industriellen SPS sehr ähnlich sind (siehe Abbildung 5.3). Als selbständige Linux-Systeme mit eigener Bedienoberfläche unterstützen sie zahlreiche Schnittstellen. Über USB ist einer der beiden Controller mit einem Raspberry Pi verbunden und über die Python-Bibliothek `ftrobopy`¹

¹ <https://github.com/ftrobopy/ftrobopy>

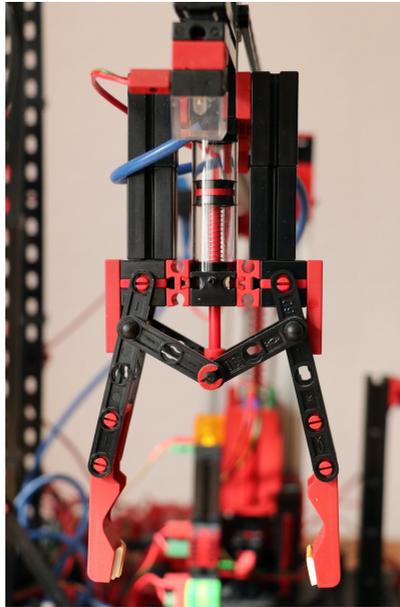


Abbildung 5.2: Pneumatischer Greifer am Fischertechnik-Minimal-Demonstrator.

können die einzelnen Ein- und Ausgänge der Controller angesteuert werden. Als Modell-HMI gibt es einige Leuchtanzeigen, die den Betrieb des Roboters signalisieren und den Werker zu einer Eingabe auffordern. Dieser kann durch Betätigen eines Tasters den Abschluss seiner Aufgabe bestätigen.

Oberhalb des gesamten Minimal-Demonstrators ist eine Webcam angebracht, die die Beobachtung der Abläufe auch aus der Ferne gestattet. Neben der Bereitstellung dieses Videostreams bildet der Raspberry Pi auch die Plattform für den zentralen OPC-UA-Server, der die einzige Schnittstelle der Demonstrator-Cobot-Zelle nach außen bildet. Der OPC-UA-Server wurde auf Basis des Eclipse Milo² OPC UA Frameworks entwickelt und die Knoten

² <https://projects.eclipse.org/projects/iot.milo>

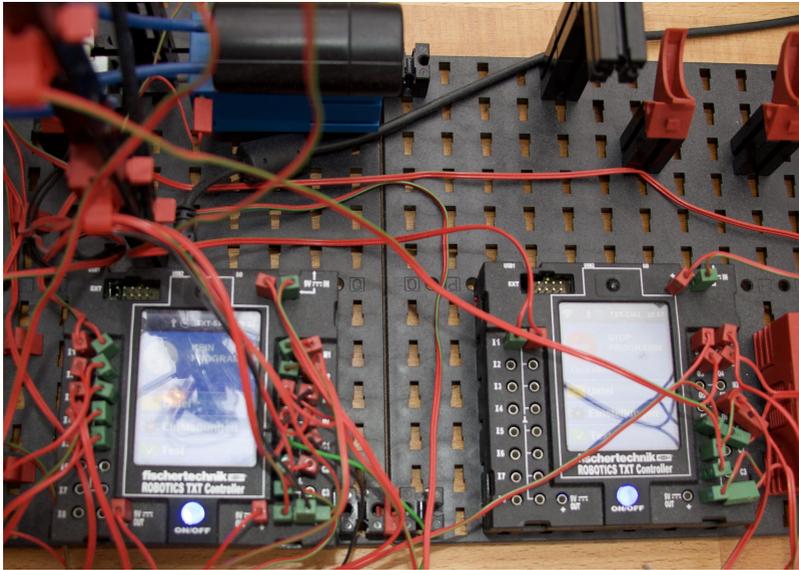


Abbildung 5.3: Die Robotics TXT Controller am Fischertechnik Minimal-Demonstrator.

des implementierten Informationsmodells entsprechen den einzelnen Assets des Modells.

Eclipse Milo ist eine Open Source Implementierung von OPC UA, die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit in der Version 0.3.8 vorliegt und bereits die wesentlichen Teile des Stacks enthält, ebenso wie die darauf basierenden SDKs für Client und Server. Insbesondere die sicherheitsrelevanten Komponenten von OPC UA sind bereits vollständig implementiert, so dass auf diesem Gebiet keine Kompromisse eingegangen werden mussten.

Da der Fokus bei diesem Minimal-Demonstrator nicht auf komplexen Arbeitsabläufen liegt, reicht ein minimalistisches Kollaborativszenario, das nur aus den folgenden drei Schritten besteht:

1. Holen eines Werkstücks durch den Roboter

2. Bearbeitung des Werkstücks durch den Werker
3. Zurücklegen des Werkstücks durch den Roboter

Bei strenger Anwendung der in Unterabschnitt 2.2.1 auf Seite 22 eingeführten Begriffe handelt es sich also nicht um eine echte Kollaboration, sondern um Synchronisation oder Kooperation, da Roboter und Mensch zu keinem Zeitpunkt gleichzeitig im selben Arbeitsraum aktiv sind.

Überblicksartig ist die informationstechnische Architektur des Minimal-Demonstrators in Abbildung 5.4 zusammengefasst. Auf der oberen Ebene, auch räumlich getrennt von der Cobot-Zelle, kann über einen Browser auf den Videostream und (links unten) über einen OPC-UA-Client auf die Steuerung und den Systemzustand zugegriffen werden.

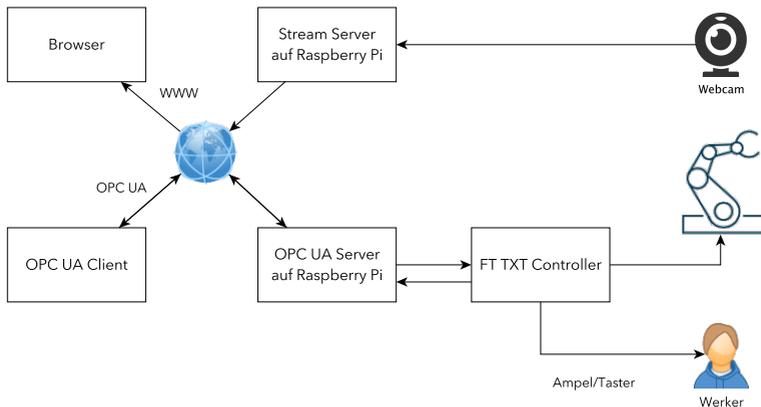


Abbildung 5.4: Architektur-Überblick der Komponenten des Fischertechnik Minimal-Demonstrators.

Bei dem Minimal-Demonstrator wurden die Simulation und der Manufacturing Integration Bus nicht implementiert. Stattdessen wurde mit Hilfe einer eigens entwickelten Oberfläche (siehe Abbildung 5.5) eine einfache Zusammenstellung eines Arbeitsplans ermöglicht. Dazu sind alle ausführbaren

Aufgaben –am Demonstrator sind es nur wenige– als Knoten des OPC-UA-Servers modelliert, werden dort vom Tool erkannt und können zu Arbeitsplänen zusammengestellt werden. Dieser Arbeitsplan kann dann auch direkt aus dem Planungswerkzeug heraus ausgeführt werden.

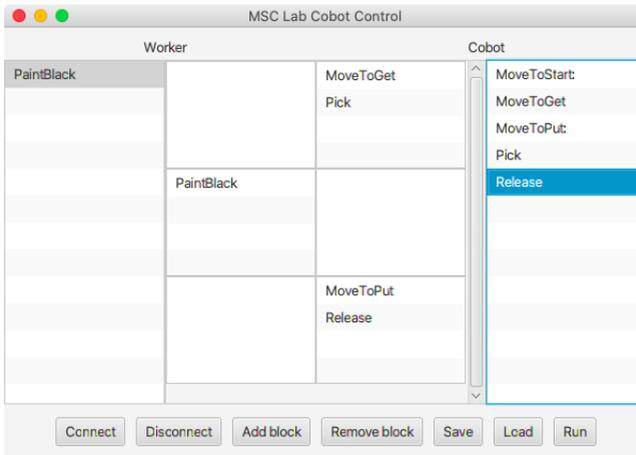
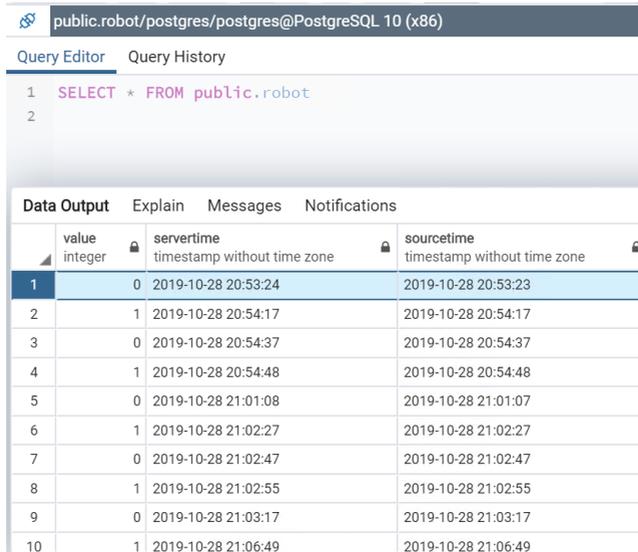


Abbildung 5.5: Grafische Oberfläche zur kollaborativen Arbeitsplanung auf OPC-UA-Basis.

Die Prozessdaten werden von einem ebenfalls auf Basis von Eclipse Milo im Rahmen dieser Arbeit entwickelten OPC-UA-Logger persistiert, der bei jeder Änderung an einem der konfigurierten Knoten des OPC-UA-Servers einen Eintrag in die angebundene PostgreSQL-Datenbank schreibt.

Das Beispiel in Abbildung 5.6 zeigt die erfassten Werte des Zustands des Roboters (binär, aktiv oder nicht aktiv, hier codiert als Integer) zu einem bestimmten Zeitpunkt. Zu beachten sind hier die zum Teil abweichenden Zeitstempel der eigentlichen Datenquelle („Source Timestamp“, hier: Robotersteuerung) und OPC-UA-Server („Server Timestamp“), wobei für die meisten Auswertungen die Verwendung des ersteren sinnvoller erscheint. Dabei ist wichtig, dass alle „Source Timestamps“ von der selben Uhr stam-

men sollten, um eine zeitbezogene Auswertung mehrerer Variablen sinnvoll zu ermöglichen.



The screenshot shows a PostgreSQL query editor interface. At the top, the connection is identified as 'public.robot/postgres/postgres@PostgreSQL 10 (x86)'. Below this, there are tabs for 'Query Editor' and 'Query History'. The query editor contains the following SQL query:

```
1 SELECT * FROM public.robot
2
```

Below the query editor, there are tabs for 'Data Output', 'Explain', 'Messages', and 'Notifications'. The 'Data Output' tab is active, displaying a table with the following data:

	value integer	servertime timestamp without time zone	sourcetime timestamp without time zone
1	0	2019-10-28 20:53:24	2019-10-28 20:53:23
2	1	2019-10-28 20:54:17	2019-10-28 20:54:17
3	0	2019-10-28 20:54:37	2019-10-28 20:54:37
4	1	2019-10-28 20:54:48	2019-10-28 20:54:48
5	0	2019-10-28 21:01:08	2019-10-28 21:01:07
6	1	2019-10-28 21:02:27	2019-10-28 21:02:27
7	0	2019-10-28 21:02:47	2019-10-28 21:02:47
8	1	2019-10-28 21:02:55	2019-10-28 21:02:55
9	0	2019-10-28 21:03:17	2019-10-28 21:03:17
10	1	2019-10-28 21:06:49	2019-10-28 21:06:49

Abbildung 5.6: Vom OPC-UA-Logger gefüllte Tabelle mit Zustandswerten des Roboters.

Im Vergleich mit einem simpleren Polling-Ansatz mit Erfassung des Roboterzustands in bestimmten Intervallen entsteht durch das Logging ausschließlich bei Änderungen eine wesentlich geringere Datenmenge. Am Minimal-Demonstrator wurden neben dem Aktivitätszustand des Roboters und des Werkers auch die Zustände der Signale und der gesamten Zelle erfasst, um exemplarisch die Funktionsweise des OPC-UA-Loggers und die Möglichkeiten in Monitoring und Analyse zu testen (siehe auch Abbildung 5.7).

Ein mit Grafana³ entwickeltes Dashboard zeigt den jeweils aktuellen Zustand der Zelle an. Mit den über mehrere simulierte Montagezyklen erhobenen Daten wurden mit R⁴ einige Analysen berechnet und grafisch dargestellt.

³ <https://www.grafana.com>

⁴ <https://www.r-project.org>

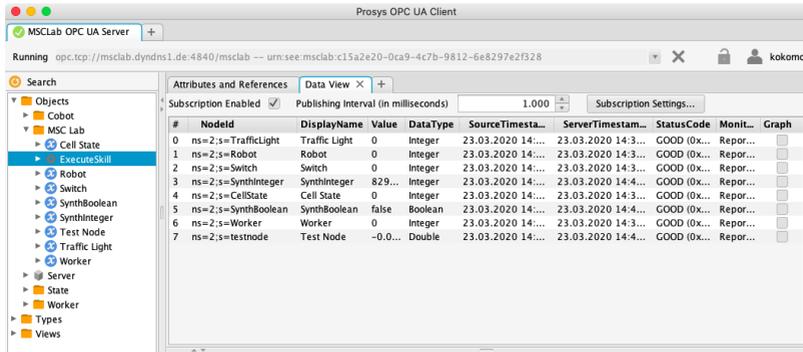


Abbildung 5.7: Darstellung der OPC-UA-Knoten und ihrer aktuellen Werte im Client.

In Abbildung 5.8 ist exemplarisch für die zur Verfügung stehenden umfangreichen Analysemöglichkeiten die mit Hilfe der geloggen Prozessdaten berechnete Bearbeitungszeit des Werkers innerhalb eines Montagevorgangs wiedergegeben, links als Zeitreihe, rechts die daraus abgeleitete Häufigkeitsverteilung. Die Betrachtung der Messwerte als Zeitreihenanalyse erlaubt zum Beispiel die Untersuchung auf Trends wie die in der Abbildung trotz des geringen Umfangs der Zeitreihe bzw. Stichprobe erkennbare Zunahme der Bearbeitungszeit. Derartige Auswertungen unterstützen das Engineering und können Ausgangspunkt der Suche nach der Ursache beobachteter Anomalien sein.

Am Minimal-Demonstrator konnten die in Tabelle 5.1 auf Seite 115 markierten Teile der Gesamtmethodik erfolgreich erprobt werden.

Einzelne Teile dieses Unterkapitels wurden bereits in Schneider (2019) veröffentlicht.

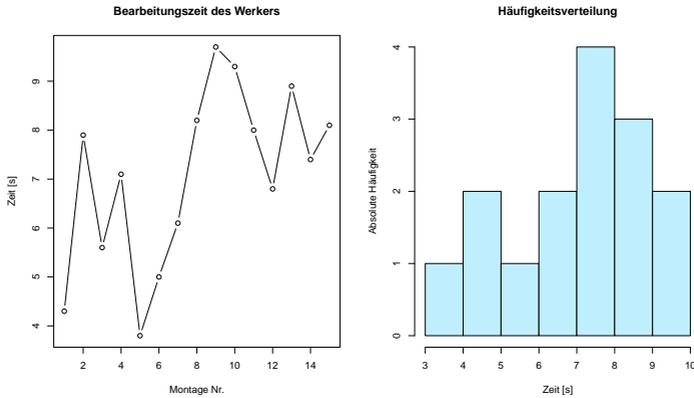


Abbildung 5.8: Beispielhafte einfache statistische Analyse der Bearbeitungszeit des Werkers am Minimal-Demonstrator.

5.3 Demonstrator mit erweitertem Funktionsumfang

Im Rahmen des durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Projekts KoKoMo wurde am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der RWTH Aachen ein Demonstrator für kollaborative Montage aufgebaut. Die in Kapitel 4 beschriebene Methodik konnte an diesem Demonstrator teilweise (siehe auch Tabelle 5.1) implementiert und getestet werden.

Der Demonstrator ist ein Arbeitsplatz mit auf Tischhöhe befestigtem Leichtbauroboter vom Typ KUKA LBR iiwa, einem Werker-Terminal und einem Werkzeugwechselsystem (siehe Abbildung 5.9).

Zur Steuerung diverser Aktoren ist eine Beckhoff SPS mit integriertem OPC-UA-Server angeschlossen, die Robotersteuerung erfolgt über einen separaten PC und die vom Hersteller zur Verfügung gestellte Software. Einen Gesamt-



Abbildung 5.9: Ansicht des am Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen aufgebauten KoKoMo Demonstrators. Foto: Simon Roggendorf (WZL RWTH Aachen). Vergrößerung in Abbildung A.6 auf Seite 157.

überblick über die beteiligten Systeme und ihre Verbindungen gibt Abbildung 5.10.

Bei dieser Implementierung der Methodik befindet sich der Manufacturing Integration Bus als zentraler Knoten im Mittelpunkt der angebotenen Systeme. Im oberen Bereich der Abbildung befindet sich die am Bremer Institut für Strukturmechanik und Produktionsanlagen (BIME) der Universität Bremen realisierte Simulation, die vom Manufacturing Integration Bus die Grobplanung erhält und eine detailliertere Planung der Montage zurückgibt. Die Kommunikation erfolgt hier über ein eigens definiertes XML-Format. In Richtung der kollaborativen Zelle (in der Abbildung nach unten) sind alle Systeme per OPC UA angebunden.

Die an die SPS (hier von Beckhoff) angeschlossenen Sensoren und Aktoren können mit geringem Aufwand per OPC UA angesprochen werden, da die SPS einen bereits vom Hersteller angebundenen OPC-UA-Server beinhaltet.

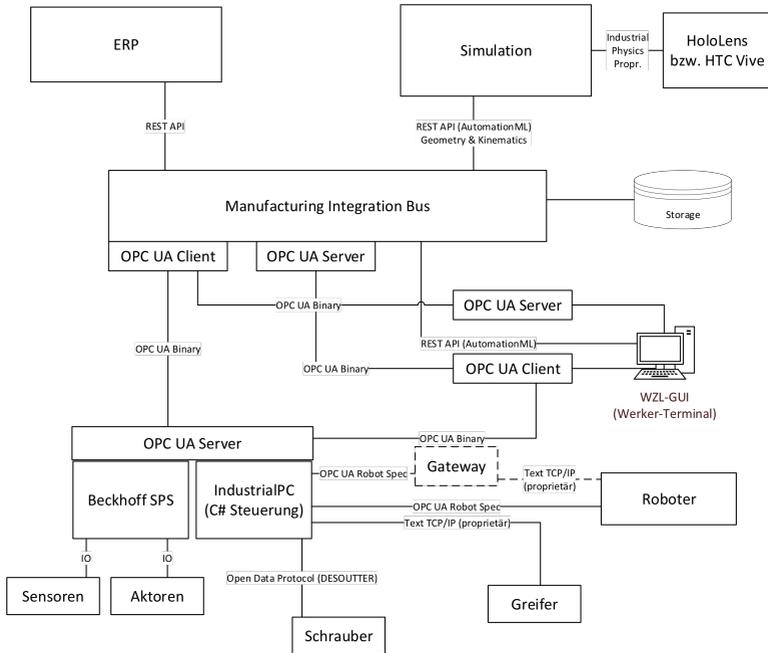


Abbildung 5.10: Systemüberblick der Komponenten am Demonstrator mit erweitertem Funktionsumfang.

Schwieriger stellt sich die Anbindung des Roboters und seiner Steuerung dar. Zwar steht mit der OPC UA Companion Specification Robotics ein standardisiertes Informationsmodell für Roboter zur Verfügung, das herstellerunabhängig ist. Jedoch eignet sich dieses nur für die Darstellung des Zustands des Roboters, jedoch nicht für die Steuerung, da die hierzu benötigten Komponenten in der Companion Specification nicht vorgesehen sind. Eine auf CollabML basierende Beschreibung des Arbeitsplans ermöglicht an diesem Demonstrator die Verteilung der Aktionen auf die beteiligten Komponenten der kollaborativen Zelle.

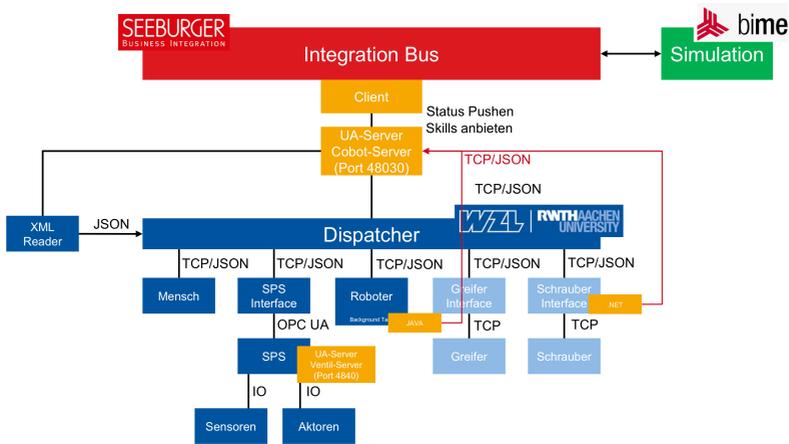


Abbildung 5.11: Systemarchitektur zur Steuerung und Rückmeldung von Prozessdaten am Demonstrator mit erweitertem Funktionsumfang. Abbildung: Simon Roggen-dorf (WZL RWTH Aachen). Vergrößerung in Abbildung A.7 auf Seite 158.

Abbildung 5.11 zeigt die beteiligten Komponenten mit dem Schwerpunkt auf dem Aspekt der Steuerung. Sie ist nach außerhalb der Zelle gekapselt und ausschließlich per OPC UA ansprechbar. Auf diesem Weg wird einerseits der aktuelle Zustand zum Manufacturing Integration Bus zur Verfügung gestellt, andererseits von dort auszuführende Arbeitspläne entgegengenommen.

Ein vom Manufacturing Integration Bus über OPC UA eintreffender Montage-Auftrag wird vom zentralen OPC-UA-Server der Zelle an einen Dispatcher übergeben, der mit den einzelnen Assets innerhalb der Zelle über ein TCP/IP-Netz verbunden ist und die einzelne Aufgabe für eine Komponente als JSON-Snippet weitergibt. Die Zustände werden wiederum zum OPC-UA-Server übertragen und dort für den Zugriff durch den Manufacturing Integration Bus bereitgestellt. Ein OPC-UA-Logger als Bestandteil des Manufacturing Integration Bus schreibt jede Änderung der Zustandsdaten der Zelle in eine angeschlossene Datenbank wie in Abschnitt 4.6 auf Seite 99 beschrieben.

Mit Hilfe dieses Demonstrators mit erweitertem Funktionsumfang konnten wesentliche Teile der gesamten Methodik erfolgreich getestet werden.

5.4 Industrielle Anlage in Inbetriebnahme

Ein wesentlicher Bestandteil des bereits oben mehrfach erwähnten Projekts KoKoMo war die Erprobung der im wissenschaftlichen Labor-Kontext erarbeiteten Methoden an drei konkreten Fällen aus der industriellen Anwendung. Eines der drei Anwenderunternehmen war die Euchner AG in Leinfelden-Echterdingen, ein mittelständischer Hersteller von Sicherheitseinrichtungen. Bei dem für die kollaborative Montage ausgewählten Produkt handelt es sich um ein Modul, das einerseits in Kombination mit anderen Teilen die Herstellung zahlreicher Varianten einer Sicherheitskäfig-Zuhaltung („MGB2“) erlaubt, andererseits selbst aber ebenfalls modular („Submodul“) aufgebaut ist und in mehreren hundert Varianten hergestellt werden kann (siehe auch Abbildung 1.1 auf Seite 6). Die Varianten unterscheiden sich durch die Kombination der drei möglichen Tastelemente.

Wie in Abschnitt 2.2 auf Seite 20 beschrieben übernimmt der Roboter auch in diesem Fall die stabilen, sich wiederholenden Aufgaben, während der Mensch die komplexeren individuellen Aufgaben übernimmt. Dabei wird die Gesamtdurchlaufzeit verkürzt durch die Errichtung von Pufferzonen, in denen Werkstücke zwischen Arbeitsschritten abgelegt werden. Dies trägt zu einer besseren Auslastung und damit Wirtschaftlichkeit bei.

Damit ergeben sich die folgenden Abläufe (Quelle: Euchner AG):

Ablaufbeschreibung Mensch

- Individuelle Montage der Rafix-Elemente

- Fügen (Nur Auflegen) der Leiterplatte
- Vormontiertes Modul in „Tray vormontiert“ (Pufferzone Nr. 1) ablegen

Ablaufbeschreibung Roboter + Anlagentechnik + Prüftechnik

- Vormontiertes Modul aus „Tray vormontiert“ abholen und alle Stationen durchreichen
- Einlegen in „Dichtigkeitsprüfvorrichtung“
- NUR wenn „Dichtigkeitsprüfvorrichtung = Leer“, sonst ablegen in „Tray geprüft“

Ablaufbeschreibung Mensch

- Modul aus der Dichtigkeitsprüfvorrichtung ODER „Tray geprüft“ entnehmen
- Endprüfung, Prüfaufkleber aufbringen, und Fertigware ablegen

Einen Teil der Anlage zur Montage und Prüfung des Submoduls zeigt Abbildung 5.12. Im Vordergrund ist der Arbeitsplatz des Werkers und die Zone der Kollaboration erkennbar. Von links können vormontierte Submodule eingelegt und vollständig montierte und geprüfte entnommen werden, von rechts kann der Roboter auf den selben Bereich zugreifen. Deutlich erkennbar sind die vertikalen gelben Leisten der Lichtvorhänge, die für sofortigen Stillstand des Roboters sorgen, sobald zum Beispiel der Werker in den gemeinsam genutzten Arbeitsraum greift. Daraus ergibt sich auch die Feststellung, dass es sich im strengeren Sinne nicht um echte Kollaboration handelt, sondern um

Synchronisation (siehe auch Unterabschnitt 2.2.1 auf Seite 22), bei der Werker und Roboter zwar im selben Arbeitsraum agieren, aber nicht zur selben Zeit.



Abbildung 5.12: Bereich der Kollaboration im Anwendungsfall Euchner, in dem die MGB2 Submodule zwischen Anlage und Werker ausgetauscht werden. Das Foto entstand während der Inbetriebnahme der Anlage.

Die in Kapitel 4 vorgestellte Methodik wurde teilweise (siehe Tabelle 5.1) für diesen Anwendungsfall implementiert. Die Anlage mit ihren Komponenten wurde dazu in AML beschrieben und ein allgemein gehaltener Arbeitsplan generiert, der für alle denkbaren Varianten übergreifend gilt und im zentralen OPC-UA-Server bereitgestellt wird. Bei Eingang eines Auftrags aus dem ERP über den Manufacturing Integration Bus (Export als CSV aus SAP) wird

der variantenbezogene Arbeitsplan generiert und die Simulation gestartet. Ergebnis der Simulation ist ein verfeinerter abgesicherter Arbeitsplan, der durch weitere Informationen wie Durchlaufzeiten angereichert ist. Bei dieser Implementierung übernimmt der Manufacturing Integration Bus im Sinne eines minimalen MES die Steuerung über den OPC-UA-Server.

Im Detail betrachtet werden bei dieser auf den speziellen Anwendungsfall der Fa. Euchner bezogenen Implementierung dabei die folgenden Schritte durchlaufen:

1. Beschreibung der gesamten Cobot-Zelle in AutomationML. Dabei können Werkzeuge wie der „Asset Configuration Manager“ aus dem Skillpro-Projekt zum Einsatz kommen.
2. Beschreibung der für die Montage aller Varianten erforderlichen Skills.
3. Fähigkeitsbasierte Planung auf Basis der in der beiden vorherigen Schritten erstellten Grundlagen. Diese Grobplanung gilt für alle Produktvarianten.
4. Über den Manufacturing Integration Bus auf Basis der Seeburger Business Integration Suite wird der Arbeitsplan in einer erweiterten Version von CollabML auf den OPC-UA-Server übertragen.
5. Die tatsächlichen Auftragsdaten aus dem SAP/ERP werden ebenfalls auf den OPC-UA-Server geschrieben.
6. Auf dieser Basis kann die Simulation der Montage der speziellen Produktvariante beginnen, die als Ergebnis einen angereicherten, detaillierteren Arbeitsplan als Ergebnis hat, der an den OPC-UA-Server zurückgegeben wird.

7. Die eigentliche Montage in der realen Welt kann nun unter Verwendung des mit Hilfe der Simulation erzeugten bzw. geprüften Arbeitsplans beginnen. Die aus der Simulation bekannten erwarteten Parameter wie z. B. Durchlaufzeiten dienen zur Kontrolle und als Referenz für die tatsächliche Montage.

Die in diesem Anwendungsfall implementierten Teile der gesamten Methodik konnten an der Anlage erfolgreich validiert werden.

5.5 Zusammenfassung

An drei Implementierungen, die jedoch jeweils nicht alle Teile der Methodik beinhalteten, wurde die Methodik validiert. An einem Minimal-Demonstrator, der einen sehr einfachen Fall der Kollaboration abbildet, konnten insbesondere die Methoden zur Steuerung, Persistierung, Monitoring und Analyse erprobt werden. Dem realen Anwendungsfall unter dem Aspekt der Steuerung und Simulation etwas näher war die Erprobung am Demonstrator mit erweitertem Funktionsumfang, bei der der Schwerpunkt auf der Simulation auf Basis des Digitalen Zwillings und der Anbindung aller Systeme über den Manufacturing Integration Bus lag. Eine Anwendung in einem mittelständischen Industrie-Unternehmen zur kollaborativen Montage eines Taster-Moduls diente abschließend zur erneuten Erprobung der Methode an einer industriellen Anlage in Inbetriebnahme. Hier lag der Schwerpunkt auf der Generierung der Arbeitspläne und der Kommunikation mit der Simulation und der Steuerung des Arbeitsablaufs über den Manufacturing Integration Bus.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine neue Methodik für Wissens- und Prozessmanagement bei der interaktiven kollaborativen Montage variantenreicher Produkte vorgestellt und validiert. In diesem Kapitel wird neben einer Zusammenfassung (Abschnitt 6.1) ein Ausblick gegeben, welche Forschungslücken weiterhin bestehen und durch zukünftige Arbeiten adressiert werden könnten (Abschnitt 6.2).

6.1 Zusammenfassung

Die kollaborative Montage variantenreicher Produkte kann für Unternehmen ein Weg sein, den Wünschen der Kunden nach individualisierten Produkten ökonomisch sinnvoll zu entsprechen. Neben zahlreichen weiteren Aspekten wie der Sicherheit oder der geeigneten Konstruktion der Anlage entscheidet ein effizientes Informationsmanagement über den Erfolg solcher Montageansätze. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Entwicklung einer Methodik für das Wissens- und Prozessmanagement bei der interaktiven kollaborativen Montage und die Beantwortung der Hauptforschungsfrage **F0** (siehe Seite 9).

„Ein Cobot ist ein Roboter, der gemeinsam mit einem menschlichen Bediener Objekte manipuliert.“ (Colgate, Wannasuphoprasit und Peshkin 1996)
Es gibt verschiedene Formen der Interaktion zwischen Mensch und Roboter, die sich durch Art und zeitliche Nutzung des gemeinsamen Arbeitsraums

abgrenzen lassen. Der Begriff „Kollaboration“ wird uneinheitlich verwendet, oft als Oberbegriff für jegliche Arbeitsweisen, an denen ein Roboter und ein Mensch beteiligt sind, im engeren Sinne bedeutet Kollaboration jedoch die gemeinsame Arbeit am selben Objekt zur selben Zeit. Aktuelle industrielle Standards wie OPC UA und AutomationML bilden die Grundlage der Methodik.

Zwar gibt es einige aktuelle Ansätze für das Informationsmanagement bei der kollaborativen Montage, es existiert jedoch noch keine Methodik zur durchgehenden Konsolidierung und Rückführung aller Daten von der Planung über die Simulation und Ausführung und zurück ins Engineering.

Zentraler Bestandteil der in dieser Arbeit präsentierten Methodik für das Informationsmanagement ist der Manufacturing Integration Bus, eine informationstechnische Einheit mit zahlreichen Schnittstellen, die alle Aspekte der kollaborativen Montage unterstützen. Sowohl das Produkt als auch die Anlage durchlaufen einen Lebenszyklus, der durch jeweils einen Digitalen Zwilling modelliert und abgebildet werden kann. Dies ermöglicht auch die Simulation der Montage vor deren tatsächlicher Ausführung. Der Manufacturing Integration Bus hält alle Daten bereit und stellt sie den beteiligten Systemen im geeigneten Format zur Verfügung.

Die Steuerung der kollaborativen Zelle kann ebenfalls vom Manufacturing Integration Bus übernommen werden, da am Markt verfügbare MES Systeme nicht alle für die kollaborative Montage erforderlichen Fähigkeiten haben. Dabei erlaubt die Methodik eine zentrale oder eine dezentrale Steuerung, je nach Anwendungsfall.

Die bei der realen Montage entstehenden Prozessdaten sind eine wertvolle Quelle für weitere Optimierungen und Engineering-Zyklen. Alle in der kollaborativen Zelle vorhandenen Assets werden per OPC UA an den aggregierenden OPC-UA-Server angebunden, so dass die Zelle nach außen durch ein einziges System vollständig repräsentiert wird. An den jeweiligen

Anwendungsfall angepasste KPIs und deren Anzeige als Dashboard erlauben ein Echtzeit-Monitoring der Montage, insbesondere durch Vergleich der tatsächlichen Werte mit den Ergebnissen der Simulation. Mit Hilfe des ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelten OPC-UA-Loggers können diese Prozessdaten in einer Datenbank persistiert werden.

Auf Basis der über einen oder mehrere Montagedurchläufe erfassten Daten können verschiedene Analysen durchgeführt werden, deren Ergebnisse in spätere Engineering-Schritte einfließen. Dabei ist die durch die Modellierung von Produkt und Anlage bekannte Struktur das wesentliche Kriterium für den Mehrwert der Analyse.

Die Methodik wird an drei verschiedenen Fallbeispielen validiert, einem Minimal-Demonstrator, einem Demonstrator mit erweitertem Funktionsumfang und einer industriellen Anlage in Inbetriebnahme. Dabei erweist sich in allen drei Fällen die Eignung der Methodik für das Informationsmanagement bei der kollaborativen Montage.

6.2 Ausblick

Trotz gewisser Chancen zeigen sich in der Praxis auch Nachteile der kollaborativen Montage, zum Beispiel die aus Sicherheitsgründen sehr langsame Bewegung und dadurch herabgesetzte Durchlaufzeit mit ihren ökonomischen Folgen. Hier könnten erweiterte Ansätze untersucht werden, zum Beispiel die weitere Aufteilung der Arbeitszonen mit schnelleren Roboterbewegungen in Bereichen, in denen sich kein Mensch aufhält. Auch die dynamische Erkennung der Bewegungen des Menschen und die Reaktion der Anlage darauf könnte weitere wirtschaftliche Vorteile bieten. Diese Ansätze müssten von einem weiterentwickelten Informationsmanagement unterstützt werden. Kritische Stimmen gelangen aufgrund dieser und weiterer Einschränkungen

sogar dazu, dass die kollaborative Montage vermieden werden sollte (Herfs u. a. 2019, S. 99).

Auch die tiefere Untersuchung der Möglichkeiten, die die Echtzeit-Simulation, also die gleichzeitige virtuelle und reale Ausführung der Montage, bieten kann, verspricht eine weitere Optimierung, besonders wenn ihre Ergebnisse zur Echtzeit-Umplanung zum Beispiel beim Eintreffen unvorhersehbarer Hindernisse genutzt werden könnte. Die Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine und ihre Unterstützung durch ein erweitertes Informationsmanagement könnte ebenfalls Gegenstand zukünftiger Forschungsansätze sein, auch unter Berücksichtigung alternativer Bedienkonzepte wie der Sprach- oder Gestensteuerung oder der Anzeige von Informationen in verschiedenen Sprachen und Komplexitätsgraden angepasst an die individuellen Fähigkeiten des jeweiligen Werkers.

Ein voraussichtlich mit der Zeit erheblich steigendes Datenvolumen der Prozessdaten könnte weitere Forschung auf dem Gebiet der Anwendung des Datastream Processings erforderlich machen. Auch fortgeschrittene Analysemöglichkeiten unter Einbeziehung moderner Ansätze (z. B. Process Mining) könnte weitere Einblicke und Nutzen aus den Prozessdaten erlauben.

Literatur

- Adolphs, P., S. Auer, H. Bedenbender, M. Billmann, M. Hankel, R. Heidel, M. Hoffmeister, H. Huhle, M. Jochem, M. Kiele u. a. (2016). *Struktur der Verwaltungsschale – Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/april/Struktur_der_Verwaltungsschale/Struktur-der-Verwaltungsschale.pdf (besucht am 31. 10. 2019).
- Aleksandrov, K., V. Schubert und J. Ovtcharova (2014). “Skill-Based Asset Management: A PLM-Approach for Reconfigurable Production Systems”. In: *Product Lifecycle Management for a Global Market*. Hrsg. von S. Fukuda, A. Bernard, B. Gurumorthy und A. Bouras. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 465–474. ISBN: 978-3-662-45937-9.
- Ameri, F. und D. Dutta (2005). “Product Lifecycle Management: Closing the Knowledge Loops”. In: *Computer-Aided Design and Applications* 2.5, S. 577–590. DOI: 10.1080/16864360.2005.10738322. URL: [http://www.cad-journal.net/files/vol_2/CAD_2\(5\)_2005_577-590.pdf](http://www.cad-journal.net/files/vol_2/CAD_2(5)_2005_577-590.pdf) (besucht am 31. 10. 2019).
- Arai, T., R. Kato und M. Fujita (2010). “Assessment of operator stress induced by robot collaboration in assembly”. In: *CIRP Annals* 59.1, S. 5–8. ISSN: 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.03.043.
- Atzori, L., A. Iera und G. Morabito (2010). “The Internet of Things: A survey”. In: *Computer Networks* 54.15, S. 2787–2805. ISSN: 1389-1286.

- DOI: 10.1016/j.comnet.2010.05.010. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128610001568>.
- Bauer, W., M. Bender, M. Braun, P. Rally und O. Scholtz (2016). *Leichtbauroboter in der manuellen Montage - einfach einfach anfangen: Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen*. URL: <http://publica.fraunhofer.de/documents/N-415110.html> (besucht am 01.11.2019).
- Bauer, W. und P. Horváth (2015). "Industrie 4.0-Volkswirtschaftliches Potenzial für Deutschland". In: *Controlling* 27.8-9, S. 515–517.
- Blankemeyer, S., D. Pischke, T. Stuke, C. Ridder, W. Herfs, S. Storms, S. Roggendorf, O. Petrovic, V. Weißkamp, T. Seckelmann, A. Barthelmey, A.-K. Ermer und J. Deuse (2019). "Aufgabenorientierte Zuordnung von Arbeitsinhalten zwischen Mensch und Roboter". In: *Projektatlas Kompetenz Montage - Kollaborativ und wandlungsfähig*. Hrsg. von F. Hees, S. Müller-Abdelrazeq, T. Langer, M. Voss, R. Schmitt, G. Huettemann, K. Rook-Weiler, K. Tracht, W. Herfs, S. Roggendorf, K. Heinen, B. Kuhlenkötter, A. Hypki, J. Deuse, G. Höptner, S. Ortmann, U. Bobe, R. Schulze, A. Zimmermann und A. Schmidt. Aachen: RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau, S. 92–97. ISBN: 978-3-948169-06-0.
- Böckenkamp, A., C. Mertens, C. Prasse, J. Stenzel und F. Weichert (2017). "A Versatile and Scalable Production Planning and Control System for Small Batch Series". In: *Industrial Internet of Things*. Hrsg. von S. Jeschke, C. Brecher, H. Song und D. B. Rawat. Basel: Springer International Publishing, S. 541–559.
- Brecher, C., S. Storms, M. Künstner und M. Obdenbusch (2017). "Schnelle Definition technologie-übergreifender Schnittstellen - Entwicklung und Verwendung von generischen OPC-UA-Informationsmodellen". In: *Robotik und Produktion* 2.1, S. 90–91. URL: <https://www.robotikproduktion.de/downloadbereich/>.

- Cencen, A., J. C. Verlinden und J. M. P. Geraedts (2018). “Design Methodology to Improve Human-Robot Coproduction in Small- and Medium-Sized Enterprises”. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 23.3, S. 1092–1102. ISSN: 1083-4435. DOI: 10.1109/TMECH.2018.2839357.
- Ciavotta, M., M. Alge, S. Menato, D. Rovere und P. Pedrazzoli (2017). “A microservice-based middleware for the digital factory”. In: *Procedia Manufacturing* 11, S. 931–938.
- Colgate, J. E., W. Wannasuphprasit und M. A. Peshkin (1996). “Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators”. In: *Proceedings of the International Mechanical Engineering Congress and Exhibition*. Bd. 58. Atlanta, S. 433–439.
- Cutting-Decelle, A.-F., R. I. Young, J.-J. Michel, R. Grangel, J. Le Cardinal und J. P. Bourey (2007). “ISO 15531 MANDATE: a product-process-resource based approach for managing modularity in production management”. In: *Concurrent Engineering* 15.2, S. 217–235.
- Davis, S. (1987). *Future Perfect*. Reading: Addison-Wesley.
- DIN ISO/TS 15066; DIN SPEC 5306:2017-04. Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter (ISO/TS 15066:2016)*. Berlin: Beuth Verlag.
- Dumonteil, G., G. Manfredi, M. Devy, A. Confetti und D. Sidobre (2015). “Reactive Planning on a Collaborative Robot for Industrial Applications”. In: *Proceedings of the 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 2: ICINCO, INSTICC*. Colmar: SciTePress, S. 450–457. ISBN: 978-989-758-123-6. DOI: 10.5220/0005575804500457.
- Eigner, M. und R. Stelzer (2009). *Product lifecycle management*. Berlin, Heidelberg: Springer.
- El Makrini, I., K. Merckaert, D. Lefeber und B. Vanderborght (2017). “Design of a collaborative architecture for human-robot assembly tasks”. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2017 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE. Vancouver, S. 1624–1629.

- Fong, T., C. Thorpe und C. Baur (2003). “Collaboration, Dialogue, Human-Robot Interaction”. In: *Robotics Research*. Hrsg. von R. A. Jarvis und A. Zelinsky. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 255–266. ISBN: 978-3-540-36460-3.
- Glaessgen, E. und D. Stargel (2012). “The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles”. In: *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA*. Honolulu, Hawaii, S. 1818. DOI: 10.2514/6.2012-1818.
- Gorecky, D., M. Schmitt, M. Loskyll und D. Zühlke (2014). “Human-machine-interaction in the industry 4.0 era”. In: *2014 12th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Porto Alegre, S. 289–294. DOI: 10.1109/INDIN.2014.6945523.
- Gosewehr, F., J. Wermann, W. Borsych und A. W. Colombo (2018). “Apache camel based implementation of an industrial middleware solution”. In: *Proceedings of the 2018 IEEE Industrial Cyber-Physical Systems (ICPS) Conference*. St. Petersburg, S. 523–528. DOI: 10.1109/ICPS42036.2018.
- Grotkamp, S. (2010). “Bewertung von Produktstrukturkonzepten im Variantenmanagement”. Diss. TU Braunschweig.
- Gutierrez-Guerrero, J. und J. Holgado-Terriza (2015). “Mobile human machine interface based in OPC UA for the control of industrial processes”. In: *Actas de las XXXVI Jornadas de Automatica*. Bilbao, S. 1073–1080. ISBN: 978-84-15914-12-9. URL: https://www.researchgate.net/profile/Jose_Miguel_Gutierrez_Guerrero/publication/283796180_Mobile_Human_Machine_Interface_based_in_OPC_UA_for_the_control_of_industrial_processes/links/56479b4c08aef646e6cfade5/Mobile-Human-Machine-Interface-based-in-OPC-UA-for-the-control-of-industrial-processes.pdf (besucht am 28.02.2020).

- Haider, A. (2013). *Information Systems for Engineering and Infrastructure Asset Management*. Wiesbaden: Gabler Verlag. ISBN: 978-3-8349-4234-0. DOI: 10.1007/978-3-8349-4234-0.
- Hankel, M. (2015). *Das Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI 4.0)*. Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. URL: https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2015/april/Das_Referenzarchitekturmodell_Industrie_4.0__RAMI_4.0_/Faktenblatt-Industrie4_0-RAMI-4_0.pdf (besucht am 01.11.2019).
- Heidel, R. (2017). *Industrie 4.0 Basiswissen RAMI 4.0 : Referenzarchitekturmodell mit Industrie 4.0-Komponente*. Hrsg. von M. Hoffmeister, M. Hankel und U. Döbrich. 1. Auflage. DIN. Berlin: Beuth Verlag. ISBN: 978-3-410-26482-8; 978-3-8007-4247-9; 3-410-26482-5.
- Henßen, R. und M. Schleipen (2014). “Interoperability between OPC UA and AutomationML”. In: Bd. 25. 8th International Conference on Digital Enterprise Technology - DET 2014 Disruptive Innovation in Manufacturing Engineering towards the 4th Industrial Revolution. Stuttgart, S. 297–304. DOI: 10.1016/j.procir.2014.10.042. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827114010737>.
- Herfs, W., S. Storms, S. Roggendorf, O. Petrovic, V. Schubert, M. Schneider, S. Erkayhan, P. Rückert, K. Tracht und K. Heinen (2019). “Produktlebenszyklusmanagement für Mensch-Roboter-Kollaboration”. In: *Projektatlas Kompetenz Montage - Kollaborativ und wandlungsfähig*. Hrsg. von F. Hees, S. Müller-Abdelrazeq, T. Langer, M. Voss, R. Schmitt, G. Huettemann, K. Rook-Weiler, K. Tracht, W. Herfs, S. Roggendorf, K. Heinen, B. Kuhlenkötter, A. Hypki, J. Deuse, G. Höptner, S. Ortman, U. Bobe, R. Schulze, A. Zimmermann und A. Schmidt. Aachen: RWTH Aachen University, Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau, S. 54–57. ISBN: 978-3-948169-06-0.

- IDC Central Europe (2018). *Internet of Things in Deutschland 2018*. URL: <https://idc.de/de/research/multi-client-projekte/internet-of-things-in-deutschland-2018> (besucht am 21.06.2019).
- IEC 62714-1:2019-02 *Engineering data exchange format for use in industrial automation systems engineering - Automation markup language - Part 1: Architecture and general requirements* (2015). Berlin: Beuth Verlag. ISBN: 978-2-8322-5521-6. DOI: 10.31030/3010109.
- Jeschke, S., C. Brecher, T. Meisen, D. Özdemir und T. Eschert (2017). “Industrial Internet of Things and Cyber Manufacturing Systems”. In: *Industrial Internet of Things: Cybermanufacturing Systems*. Hrsg. von S. Jeschke, C. Brecher, H. Song und D. B. Rawat. Cham: Springer International Publishing, S. 3–19. ISBN: 978-3-319-42559-7. DOI: 10.1007/978-3-319-42559-7_1.
- Jost, J., T. Kirks, B. Mättig, A. Sinsel und T. U. Trapp (2016). “Der Mensch in der Industrie–Innovative Unterstützung durch Augmented Reality”. In: *Handbuch Industrie 4.0: Produktion, Automatisierung und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 153–174.
- Kadir, B. A., O. Broberg und C. S. da Conceição (2018). “Designing human-robot collaborations in industry 4.0: explorative case studies”. In: *DS92: Proceedings of the DESIGN 2018 15th International Design Conference*. Dubrovnik, S. 601–610. DOI: 10.21278/idc.2018.0319.
- Kluge, S. (2011). “Methodik zur fähigkeitsbasierten Planung modularer Montagesysteme”. Diss. Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart.
- Krüger, J., T. Lien und A. Verl (2009). “Cooperation of human and machines in assembly lines”. In: *CIRP Annals* 58.2, S. 628–646. ISSN: 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2009.09.009. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850609001760>.
- Labbus, I., C. Schmidt, S. Thiede und C. Herrmann (2017). “Integration of production data for life-cycle cost-oriented process chain planning”. In:

- ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 112.9, S. 540–543.
DOI: 10.3139/104.111775.
- Leitão, P., J. Barbosa, A. Pereira, J. Barata und A. W. Colombo (2016). “Specification of the PERFoRM architecture for the seamless production system reconfiguration”. In: *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. Florenz, S. 5729–5734. DOI: 10.1109/IECON.2016.7793007.
- Lüder, A. und N. Schmidt (2016). “AutomationML in a Nutshell”. In: *Handbuch Industrie 4.0: Produktion, Automatisierung und Logistik*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 213–258.
- Mahnke, W., S.-H. Leitner und M. Damm (2009). *OPC Unified Architecture*. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-68899-0. DOI: 10.1007/978-3-540-68899-0.
- Malik, A. A. und A. Bilberg (2017). “Framework to implement Collaborative Robots in Manual Assembly: A Lean Automation Approach.” In: *Proceedings of the 28th DAAAM International Symposium*. Wien, S. 1151–1160. ISBN: 978-3-902734-11-2. DOI: 10.2507/28th.daaam.proceedings.160.
- Monostori, L., B. Kádár, T. Bauernhansl, S. Kondoh, S. Kumara, G. Reinhart, O. Sauer, G. Schuh, W. Sihn und K. Ueda (2016). “Cyber-physical systems in manufacturing”. In: *CIRP Annals* 65.2, S. 621–641. ISSN: 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2016.06.005. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850616301974>.
- Moore, R. K. (2017). “Is Spoken Language All-or-Nothing? Implications for Future Speech-Based Human-Machine Interaction”. In: *Dialogues with Social Robots: Enablements, Analyses, and Evaluation*. Hrsg. von K. Jokinen und G. Wilcock. Singapore: Springer Singapore, S. 281–291. ISBN: 978-981-10-2585-3. DOI: 10.1007/978-981-10-2585-3_22.

- Müller, R., M. Vette und O. Mailahn (2016). “Process-oriented Task Assignment for Assembly Processes with Human-robot Interaction”. In: *Procedia CIRP – 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS)*. Bd. 44. 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS). Göteborg, S. 210–215. DOI: 10.1016/j.procir.2016.02.080. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116003620>.
- NASA (2012). *Cyber-physical systems modeling and analysis (CPSMA) initiative*. URL: http://www.nasa.gov/centers/ames/cct/office/studies/cyber-physical_systems.html (besucht am 10.12.2019).
- OPC Foundation (2015). *OPC UA Specification*. Techn. Ber. OPC Foundation. URL: <https://opcfoundation.org/developer-tools/specifications-unified-architecture/> (besucht am 10.12.2019).
- Ovtcharova, J. (2010). *Vorlesung Virtual Engineering*. URL: http://tu.nuclear868.net/Virtual%20Engineering/Vorlesungsfolien/1_VE1_Einleitung_Katicic_fixed.pdf (besucht am 16.09.2019).
- Ovtcharova, J. (2019). *Vorlesung Virtual Engineering I, KIT*.
- Papadopoulos, C., I. Mariolis, A. Topalidou-Kyniazopoulou, G. Piperagkas, D. Ioannidis und D. Tzovaras (2017). “An Advanced Human-Robot Interaction Interface for Teaching Collaborative Robots New Assembly Tasks”. In: *Interactive Collaborative Robotics*. Hrsg. von A. Ronzhin, G. Rigoll und R. Meshcheryakov. Cham: Springer International Publishing, S. 180–190. ISBN: 978-3-319-66471-2.
- Pauker, F., I. Ayatollahi und B. Kittl (2014). “OPC UA for machine tending industrial robots - Prototypic development of an OPC UA Server for ABB industrial robots”. In: *Proceedings of the Second International Conference on Advances in Mechanical and Robotics Engineering – AMRE 2014*. Zürich, S. 79–83. ISBN: 978-1-63248-031-6. DOI: 10.15224/978-1-63248-031-6-155.

- Pauker, F., T. Frühwirth, B. Kittl und W. Kastner (2016). "A Systematic Approach to OPC UA Information Model Design". In: *Procedia CIRP – 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS 2016)*. Bd. 57. Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Stuttgart, S. 321–326. DOI: 10.1016/j.procir.2016.11.056. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827116312100>.
- Pethig, F., O. Niggemann und A. Walter (2017). "Towards Industrie 4.0 compliant configuration of condition monitoring services". In: *IEEE 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. Emden, S. 271–276.
- Pfrommer, J., D. Stogl, K. Aleksandrov, V. Schubert und B. Hein (2014). "Modelling and orchestration of service-based manufacturing systems via skills". In: *Proceedings of the 2014 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. Barcelona. ISBN: 978-1-4799-4846-8. DOI: 10.1109/ETFA.2014.7005285.
- Pfrommer, J., M. Schleipen und J. Beyerer (2013). "PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource". In: *Proceedings of the 2013 IEEE Emerging Technology and Factory Automation (ETFA)*. Cagliari. ISBN: 978-1-4799-0864-6. DOI: 10.1109/ETFA.2013.6647929.
- Piller, F. (2006). *Mass Customization – Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag. ISBN: 978-3-8350-9204-4. DOI: 10.1007/978-3-8350-9204-4.
- Piller, F. (2010). "Mass Customization: A Strategy for Customer-Centric Enterprises - A Review of the Strategic Capabilities to Make Mass Customization Work". In: *Customer-Driven Supply Chains – From Glass Pipelines to Open Innovation Networks*. Hrsg. von A. C. Lyons, A. E. C.

- Mondragon, F. Piller und R. Poler. London Dordrecht Heidelberg New York: Springer. Kap. 4, S. 71–94. DOI: 10.2139/ssrn.1720785.
- Plattform Industrie 4.0* (2018). URL: <https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html> (besucht am 13. 11. 2018).
- Ponn, J. und U. Lindemann (2008). “Variantenreiche Produkte”. In: *Konzeptentwicklung und Gestaltung technischer Produkte: Optimierte Produkte - systematisch von Anforderungen zu Konzepten*. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Kap. 11, S. 227–252. ISBN: 978-3-540-68563-0. DOI: 10.1007/978-3-540-68563-0_12.
- Profanter, S., K. Dorofeev, A. Zoitl und A. Knoll (2017). “OPC UA for plug & produce: Automatic device discovery using LDS-ME”. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Emerging Technologies And Factory Automation (ETFA)*. Limassol, Zypern. DOI: 10.1109/ETFA.2017.8247569.
- Roggendorf, S., C. Ecker, S. Storms und W. Herfs (2019). “Simulation-Based Planning of Grasping Processes for Assembly Robots”. In: *Advances in Production Research. WGP 2018*. Hrsg. von R. Schmitt und G. Schuh. Cham, Schweiz: Springer, S. 228–236. ISBN: 978-3-030-03451-1 978-3-030-03450-4. DOI: 10.1007/978-3-030-03451-1_23.
- Rückert, P., J. Adam, B. Papenberg, H. Paulus und K. Tracht (2018). “Calibration of a modular assembly system for personalized and adaptive human robot collaboration”. In: *Procedia CIRP – 7th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS 2018)*. Bd. 76. Tianjin, China, S. 199–204. DOI: 10.1016/j.procir.2018.01.041. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827118301239>.
- Rückert, P., F. Meiners und K. Tracht (2018). “Augmented Reality for teaching collaborative robots based on a physical simulation”. In: *Ta-gungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter*. Hrsg. von T. Schüppstuhl, K. Tracht und J. Franke. Berlin Heidelberg:

- Springer Vieweg, S. 41–48. ISBN: 978-3-662-56714-2 978-3-662-56713-5. DOI: 10.1007/978-3-662-56714-2_5.
- Rückert, P., K. Tracht, W. Herfs, S. Roggendorf, V. Schubert und M. Schneider (2019). “Consolidation of Product Lifecycle Information within Human-Robot Collaboration for Assembly of Multi-Variant Products”. In: *8th International Conference on Through-Life Engineering Service*. Cleveland, Ohio, Preprint.
- Rückert, P., L. Wohlfromm und K. Tracht (2018). “Implementation of virtual reality systems for simulation of human-robot collaboration”. In: *Procedia Manufacturing* 19, S. 164–170.
- Sadik, A. R. und B. Urban (2017). “An Ontology-Based Approach to Enable Knowledge Representation and Reasoning in Worker–Cobot Agile Manufacturing”. In: *Future Internet* 9.4, S. 90. DOI: 10.3390/fi9040090.
- Saenz, J., N. Elkmann, O. Gibaru und P. Neto (2018). “Survey of methods for design of collaborative robotics applications-Why safety is a barrier to more widespread robotics uptake”. In: *Proceedings of the 2018 4th International Conference on Mechatronics and Robotics Engineering*. Valenciennes, Frankreich, S. 95–101. DOI: 10.1145/3191477.3191507.
- Schel, D., C. Henkel, D. Stock, O. Meyer, G. Rauhöft, P. Einberger, M. Stöhr, M. A. Daxer und J. Seidelmann (2017). “Manufacturing service bus: an implementation”. In: *Procedia CIRP – 11th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*. Hrsg. von R. Teti und D. M. D’Addona. Bd. 67. Golf von Neapel, Italien, S. 179–184. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221282711731140X>.
- Schleipen, M., Hrsg. (2018). *Praxishandbuch OPC UA - Grundlagen, Implementierung, Nachrüstung, Praxisbeispiele*. Würzburg: Vogel Business Media.

- Schleipen, M., B. Hein, J. Pfrommer, K. Aleksandrov, D. Štogl, S. Escaida Navarro und J. Beyerer (2014). “AutomationML to describe skills of production plants based on the PPR concept”. In: *Proceedings of the 3rd AutomationML User Conference*. Blomberg, Deutschland. URL: https://www.researchgate.net/profile/Miriam_Schleipen/publication/266741734_AutomationML_to_describe_skills_of_production_plants_based_on_the_PPR_concept/links/543b702d0cf204cab1dafa01.pdf.
- Schneider, M. (2019). “Informationsmanagement für Szenarien der kollaborativen Montage”. In: *d1g1tal AGENDA* 2.10, S. 18–21. URL: <https://d1g1tal.de/ausgabe-03-2019-der-d1g1tal-agenda-verfuegbar/>.
- Sendler, U. (2009). *Das PLM-Kompendium: Referenzbuch des Produkt-Lebenszyklus-Managements*. Dordrecht Heidelberg London New York: Springer. ISBN: 978-3-540-87898-8. DOI: 10.1007/978-3-540-87898-8.
- Sheikholeslami, S., A. Moon und E. A. Croft (2017). “Cooperative gestures for industry: Exploring the efficacy of robot hand configurations in expression of instructional gestures for human–robot interaction”. In: *The International Journal of Robotics Research* 36.5-7, S. 699–720. DOI: <https://doi.org/10.1177/0278364917709941>.
- Stark, J. (2015). “Product lifecycle management”. In: *Product lifecycle management (Volume 1)*. Cham Dordrecht Heidelberg London New York: Springer, S. 1–29. ISBN: 978-3-319-17439-6. DOI: 10.1007/978-3-319-17440-2.
- Stark, R., S. Kind und S. Neumeyer (2017). “Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design”. In: *CIRP Annals* 66.1, S. 169–172. ISSN: 0007-8506. DOI: 10.1016/j.cirp.2017.04.045. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850617300458>.

- Steinbauer, C. (2012). “Modell zur Konfiguration der Kleinserienmontage”.
Diss. Technische Universität München.
- Storms, S., S. Roggendorf, F. Stamer, M. Obdenbusch und C. Brecher (2017).
“PLM -supported automated process planning and partitioning for col-
laborative assembly processes based on a capability analysis”. In: 7.
*WGP-Jahreskongress Aachen, 5.-6. Oktober 2017 / Herausgeber: Ro-
bert Schmitt, Günther Schuh*. 7. WGP-Jahreskongress, Aachen (Ger-
many), 5 Oct 2017 - 6 Oct 2017. Aachen: Apprimus Verlag, S. 241–
249. URL: [https://publications.rwth-aachen.de/record/
712002](https://publications.rwth-aachen.de/record/712002).
- Tao, F., J. Cheng, Q. Qi, M. Zhang, H. Zhang und F. Sui (2018). “Digital
twin-driven product design, manufacturing and service with big data”.
In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*
94.9, S. 3563–3576. ISSN: 1433-3015. DOI: 10.1007/s00170-
017-0233-1.
- Thiebes, F. und N. Plankert (2014). “Umgang mit Komplexität in der Pro-
duktentwicklung – Komplexitätsbeherrschung durch Variantenmanage-
ment”. In: *Komplexitätsmanagement in Unternehmen: Herausforderun-
gen im Umgang mit Dynamik, Unsicherheit und Komplexität meistern*.
Hrsg. von K.-P. Schoeneberg. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wies-
baden, S. 165–185. ISBN: 978-3-658-01284-7. DOI: 10.1007/978-
3-658-01284-7_8.
- Thoben, K.-D., S. Wiesner und T. Wuest (2017). “‘Industrie 4.0’ and smart
manufacturing—a review of research issues and application examples”.
In: *International Journal of Automation Technology* 11.1, S. 4–16.
- Wang, X. V., Z. Kemény, J. Váncza und L. Wang (2017). “Human–robot col-
laborative assembly in cyber-physical production: Classification frame-
work and implementation”. In: *CIRP annals* 66.1, S. 5–8.
- Wang, Y., H.-S. Ma, J.-H. Yang und K.-S. Wang (2017). “Industry 4.0: a
way from mass customization to mass personalization production”. In:

- Advances in Manufacturing* 5.4, S. 311–320. ISSN: 2195-3597. DOI: 10.1007/s40436-017-0204-7.
- Warnecke, H.-J. (1996). “Flexible Montagetechnik”. In: *Die Montage im flexiblen Produktionsbetrieb*. Hrsg. von H.-J. Warnecke. Berlin Heidelberg: Springer, S. 19–155.
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications : design and methods*. Sixth edition. Los Angeles: SAGE. ISBN: 9781506336169.
- Yin, S., S. X. Ding, X. Xie und H. Luo (2014). “A review on basic data-driven approaches for industrial process monitoring”. In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 61.11, S. 6418–6428.

A Anhang

A.1 Vergrößerte grafische Darstellungen

In diesem Anhang werden einige Abbildungen rotiert vergrößert wiedergegeben, die aufgrund des Formats im Fließtext nicht optimal dargestellt werden konnten. Zur größeren Darstellung wurden die Abbildungen im Querformat um 90 Grad gegen den Uhrzeigersinn rotiert.

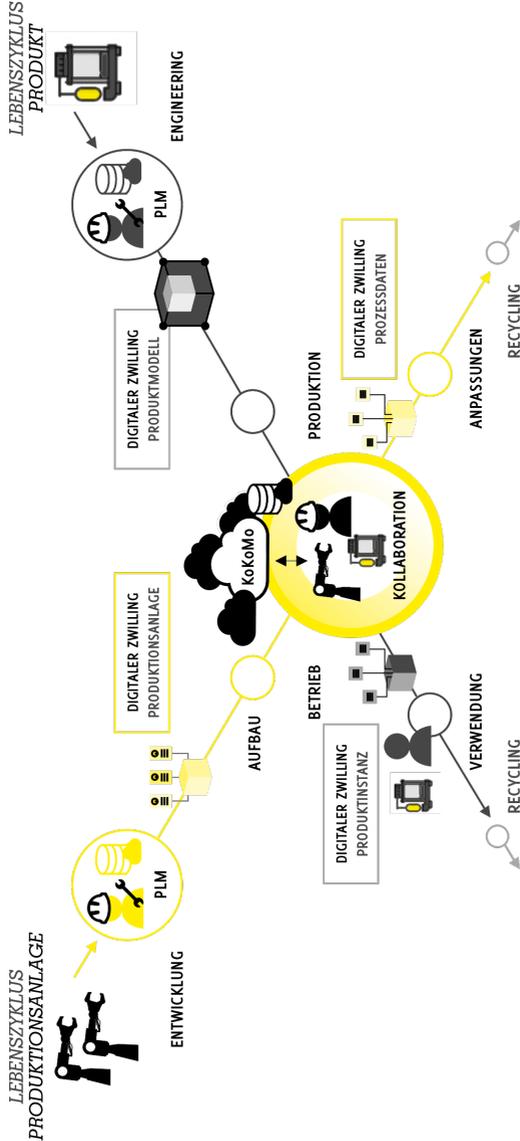


Abbildung A.1: Beziehung zwischen den Lebenszyklen von Produkt und Produktionsanlage (Herfs, Storms, Roggendorf, Petrovic, Schubert, Schneider, Erkayhan, Rückert, Tracht und Heinen 2019, S. 55).

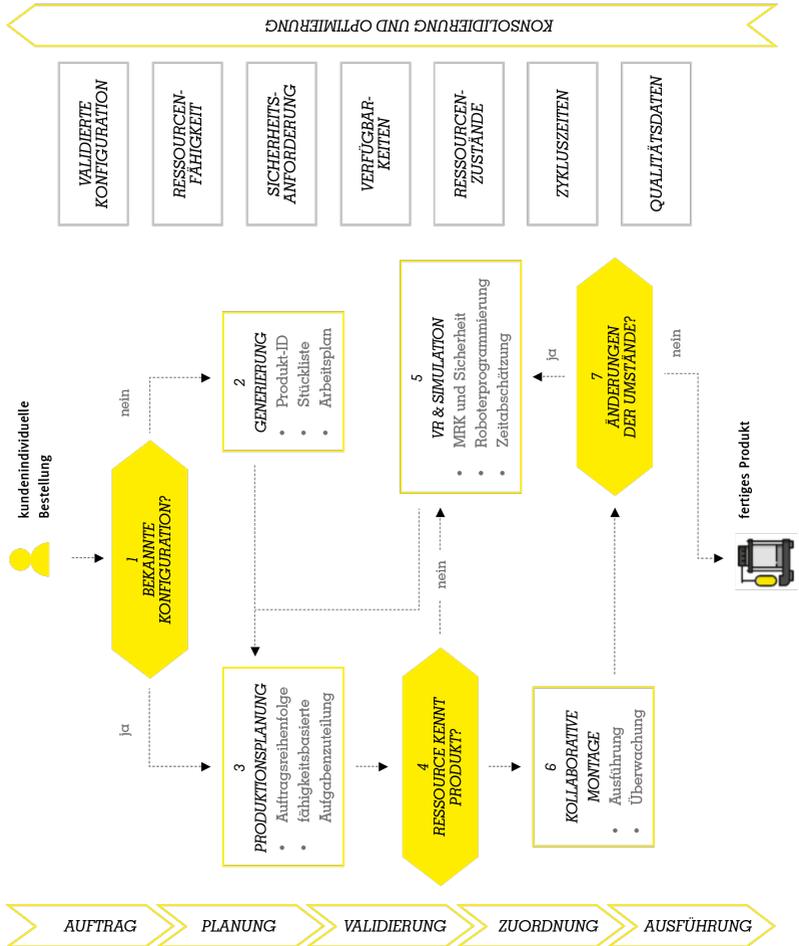


Abbildung A.2: Die KoKoMo-Methode: Workflow von der Bestellung zum finalen Produkt nach Herfs, Storms, Rogendorf, Petrovic, Schubert, Schneider, Erkayhan, Rückert, Tracht und Heinen 2019, S. 57.

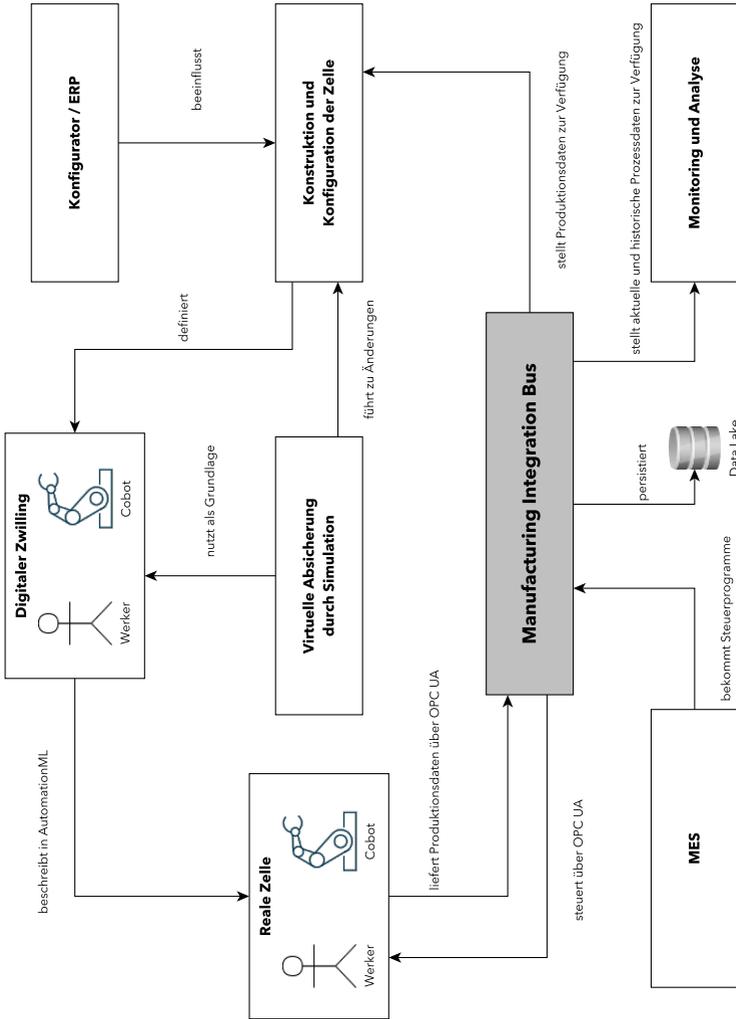


Abbildung A.3: Übersicht zur Rolle des Manufacturing Integration Bus im Kontext der gesamten Methodik.

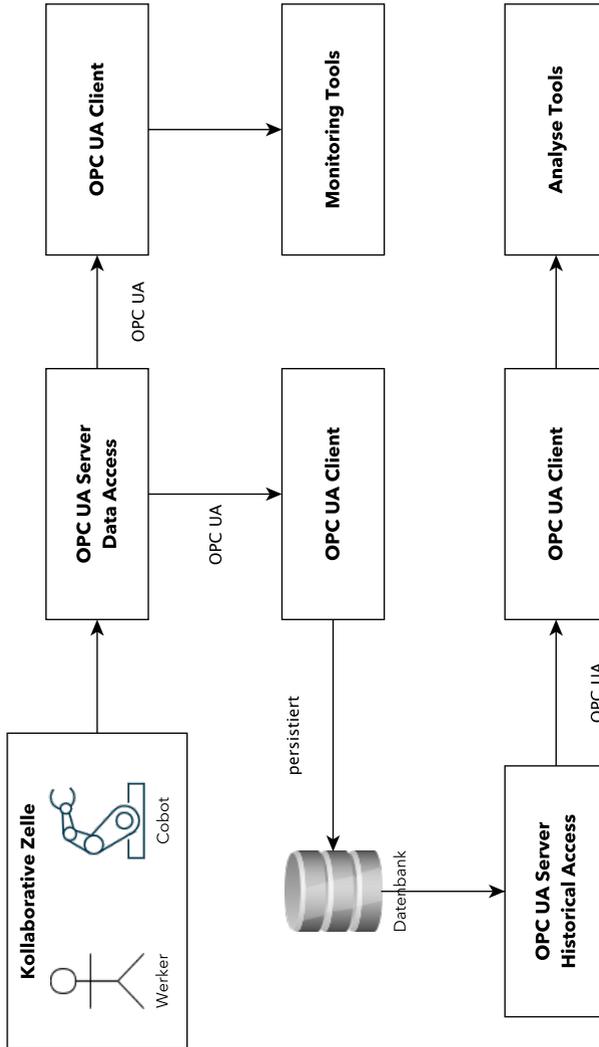


Abbildung A.4: Datenfluss zur Persistierung von Prozessdaten mit angeschlossenem Monitoring und Analyse auf Basis von OPC UA.

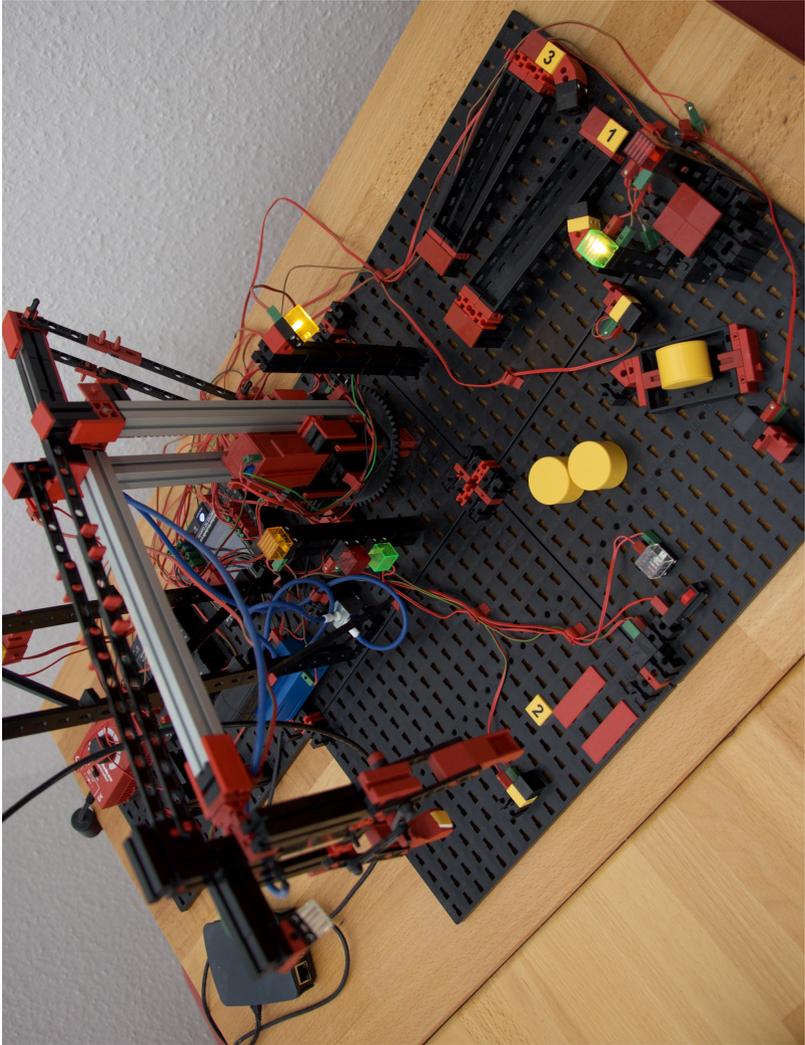


Abbildung A.5: Gesamtüberblick über den Fischertechnik Minimal-Demonstrator zur Veranschaulichung kollaborativer Montage.

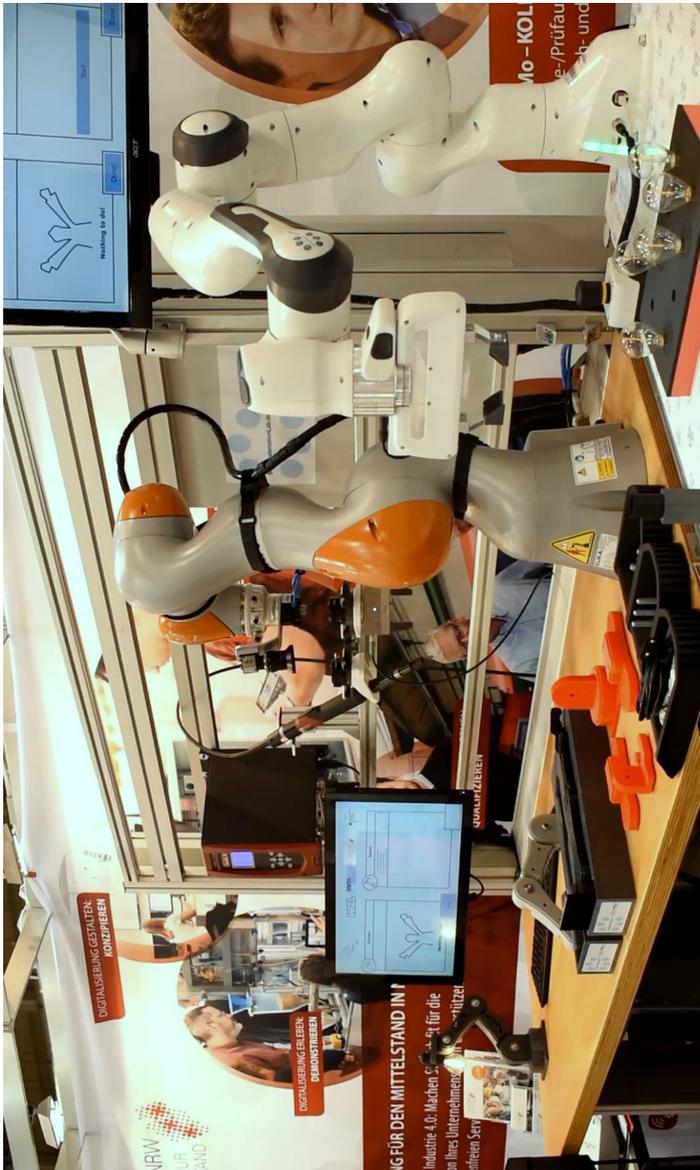


Abbildung A.6: Ansicht des am Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen aufgebauten KoKoMo Demonstrators. Foto: Simon Roggendorf (WZL RWTH Aachen).

A.2 CollabML

Die folgende Definition und das zugehörige Beispiel stellen eine auf die wesentlichen Elemente vereinfachte Variante von CollabML dar, die in der Anwendung um weitere Informationen angereichert werden kann.

A.2.1 Definition (XSD)

```

<xs:schema attributeFormDefault="unqualified"
  ↪ elementFormDefault="qualified" xmlns:xs="http://
  ↪ www.w3.org/2001/XMLSchema">
  <xs:simpleType name="integerlist">
    <xs:list itemType="xs:integer"/>
  </xs:simpleType>
  <xs:element name="AssemblyOrder">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element type="xs:integer" name="id"/>
        <xs:element type="xs:integer" name="productId"/>
        <xs:element name="task" maxOccurs="unbounded"
          ↪ minOccurs="0">
          <xs:complexType>
            <xs:sequence>
              <xs:element type="xs:integer" name="id"/>
              <xs:element name="waitForTasks" type="
                ↪ integerlist"/>
              <xs:element type="xs:string" name="name"/>
              <xs:element type="xs:integer" name="
                ↪ defaultResource"/>
              <xs:element name="resources">
                <xs:complexType>

```


A.2.2 Beispiel (XML)

```
<AssemblyOrder>
  <id>8653</id>
  <productId>34</productId>
  <task>
    <id>1</id>
    <waitForTasks/>
    <name>Pick & Place part 378</name>
    <defaultResource>2</defaultResource>
    <resources>
      <resource>
        <id>1</id>
        <name>Worker</name>
        <taskDescription>task86432worker.xml</
          ↪ taskDescription>
      </resource>
      <resource>
        <id>2</id>
        <name>Cobot 1</name>
        <taskDescription>task86432cobot.xml</
          ↪ taskDescription>
      </resource>
    </resources>
  </task>
  <task>
    <id>2</id>
    <waitForTasks/>
    <name>Pick & Place part 385</name>
    <defaultResource>2</defaultResource>
    <resources>
```

```
<resource>
  <id>1</id>
  <name>Worker</name>
  <taskDescription>task86435worker.xml</
    ↪ taskDescription>
</resource>
<resource>
  <id>2</id>
  <name>Cobot 1</name>
  <taskDescription>task86435cobot.xml</
    ↪ taskDescription>
</resource>
</resources>
</task>
<task>
  <id>3</id>
  <waitForTasks>1 2</waitForTasks>
  <name>Assemble parts 378 and 385</name>
  <defaultResource>1</defaultResource>
  <resources>
    <resource>
      <id>1</id>
      <name>Worker</name>
      <taskDescription>task86439worker.xml</
        ↪ taskDescription>
    </resource>
  </resources>
</task>
<task>
  <id>4</id>
  <waitForTasks>3</waitForTasks>
```

```
<name>Move assembly</name>
<defaultResource>2</defaultResource>
<resources>
  <resource>
    <id>1</id>
    <name>Worker</name>
    <taskDescription>task86481worker.xml</
      ↪ taskDescription>
  </resource>
  <resource>
    <id>2</id>
    <name>Cobot 1</name>
    <taskDescription>task86481cobot.xml</
      ↪ taskDescription>
  </resource>
</resources>
</task>
</AssemblyOrder>
```