

Vorgehensmodelle für die virtuelle Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen

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

vorgelegt von
Benjamin Illmer, M.Sc.
aus Rüdersdorf (bei Berlin)

Saarbrücken

2022

Tag des Kolloquiums: 11.08.2022

Dekan: Prof. Dr. Jörn Erik Walter

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber
Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Dirk Bähre

Akad. Mitarbeiter: Dr.-Ing. Marcel Otto

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus anderen Quellen oder indirekt übernommenen Daten und Konzepte sind unter Angabe der Quelle gekennzeichnet. Die Arbeit wurde bisher weder im In- noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form in einem Verfahren zur Erlangung eines akademischen Grades vorgelegt.

Ort, Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Industriellen Produktionsunternehmen werden mit der Einführung cyber-physischer Produktionssysteme „neue“ Möglichkeiten innerhalb der strategischen Produktionsausrichtung angeboten, um den vielseitigen Herausforderungen in einem turbulenten Unternehmensumfeld zu begegnen. Jedoch bestehen weiterhin teilweise große unternehmensseitige Unsicherheiten im Verständnis der Begrifflichkeit dieser neuen Systemtechnologie sowie einer strategischen Umsetzung und Implementierung.

Diese Unsicherheiten aufgreifend, ist ein Ziel dieser Arbeit zunächst den Begriff der cyber-physischen Produktionssysteme zu präzisieren. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist eine Unterstützung bei der Systemimplementierung, durch bereits etablierte Entwicklungswerkzeuge, zu liefern. Das wesentliche Entwicklungswerkzeug in dieser Arbeit ist der Prozess der virtuellen Inbetriebnahme. Mit der virtuellen Inbetriebnahme, als festen Bestandteil vieler Entwicklungsprozessketten, werden Vorgehensmodelle erarbeitet, die eine schrittweise wie auch simulationsbasierte Implementierung von Bestandteilen cyber-physischer Produktionssysteme anbieten. Die Erarbeitung von Vorgehensmodellen zur virtuellen Inbetriebnahme von Bestandteilen cyber-physischer Produktionssysteme ist das übergeordnete Ziel dieser Arbeit.

Abstract

The introduction of cyber-physical production systems offers industrial production companies "new" opportunities within the strategic production orientation in order to meet diverse challenges in a turbulent enterprise environment. However, there are still some major uncertainties within companies in understanding the terminology of this new system technology as well as approaches for a strategic realization and implementation.

Addressing these uncertainties, the first goal of this thesis is to clarify the meaning of the term cyber-physical production systems. A second goal of this thesis is to provide capabilities for the systems implementation, using already established development tools. In this thesis, the whole process of virtual commissioning marks the major development tool. Using virtual commissioning as an established part of many development-oriented process chains, procedures are developed, which offer a step-by-step and simulation-based implementation of cyber-physical production systems elements. The development of procedures for the virtual commissioning of elements of cyber-physical production systems represents the overall objective of this thesis.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik an der Universität des Saarlandes von Juli 2019 bis Januar 2022 und am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik von Mai 2016 bis Juni 2019.

Meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Vielhaber, möchte ich für das entgegengebrachte Vertrauen, die Promotionsmöglichkeit sowie die fachliche Begleitung während der Erstellung dieser Arbeit ganz besonders danken. Durch seine offene Kommunikation und seine konstruktive Kritik in vielen motivierenden Fachgesprächen, ist es ihm gelungen mein fachliches Interesse und meinen Ehrgeiz für das wissenschaftliche Arbeiten zu wecken.

Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kristin Paetzold vom Institut für Technische Produktentwicklung an der Universität der Bundeswehr München danke ich für die freundliche Übernahme des Zweitgutachtens, das inhaltliche Interesse und die konstruktiven inhaltlichen Diskussionen.

Ein großer Dank gilt meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Konstruktionstechnik Uta Wilhelm, Jerome Kaspar, Dr.-Ing. Pascal Stoffels, Jan Schneberger, Simon Mörsdorf, Dominik Neumann, Kristian König und Patrick Christoffel, die für mich herausragende Ansprechpartner in organisatorischen und fachlichen Fragestellungen waren.

Ich danke zudem meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik Dr.-Ing. Marcel Otto, Christian Siegwart, Lennard Margies, Prof.-Dr.-Ing. Matthias Scholer, Anne Blum, Dr.-Ing. Leonie Mende und Martin Karkowski für den intensiven fachlichen Austausch und die gegenseitige Unterstützung auf den gemeinsamen Wegen unserer Promotionsvorhaben.

Mein größter Dank gilt meiner Mutter, Frau Monika Illmer-Ott, die mir in jeglicher Hinsicht keine bessere Grundlage auf dem Weg zu dieser Promotion hätte bieten können. Ihr möchte ich diese Arbeit widmen. Ich danke Frau Anne Kondziele für den schwesterlichen Rückhalt und dafür, dass sie stets an die Fertigstellung dieser Arbeit geglaubt hat. Ich möchte Herrn Andreas Ott für seinen väterlichen Rückhalt und seine persönliche Unterstützung auf dem Weg zu dieser Arbeit danken. Meiner Lebensgefährtin, Frau Kanphirom Sawatsri, möchte ich herzlichst für ihr Verständnis und ihren vertrauensvollen Zuspruch auf das Gelingen dieser Arbeit danken.

Schließlich möchte ich Herrn Marcus Hamm und Herrn Dominic Bohatschek für ihre bis heute anhaltende freundschaftliche Unterstützung aus Berlin danken.

Für weiterführende Diskussionen, die den Inhalt dieser Arbeit betreffen, stehe ich gerne zur Verfügung.

Saarbrücken, im Februar 2022

Benjamin Illmer

I. Inhaltsverzeichnis

I.	Inhaltsverzeichnis.....	VIII
II.	Abkürzungsverzeichnis.....	XVI
III.	Abbildungsverzeichnis.....	XVIII
IV.	Tabellenverzeichnis.....	XXI
1	Einleitung.....	1
1.1	Ausgangssituation	1
1.2	Zielsetzung.....	4
1.3	Verständnis wissenschaftlichen Arbeitens	5
1.4	Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit.....	6
2	Grundlagen	10
2.1	Begriffsbestimmung	10
2.1.1	Methode, Methodik, Methodologie.....	10
2.1.2	Prozesse, Konzepte, Verfahren und Vorgehensmodelle	18
2.1.3	Modell, System und Simulation.....	20
2.1.4	Mechatronik und mechatronische Systeme.....	21
2.1.5	Eingebettete Systeme.....	23
2.1.6	Cyber-physische Systeme	24
2.1.7	Produktion und Produktionssysteme	26

2.1.8 Cyber-physische Produktionssysteme	28
2.1.9 Verifikation, Validierung und Absicherung.....	30
2.1.10 Inbetriebsetzung, Inverkehrbringen, Inbetriebnahme und in Betrieb nehmen	32
2.2 Produktionsentstehungsprozess.....	34
2.2.1 Produktionssystemplanung	35
2.2.2 Produktionssystementwicklung.....	36
2.2.3 Produktionssystemrealisierung	38
2.2.4 Einordnung in den Produktentstehungsprozess	40
2.3 Virtuelle Inbetriebnahme.....	41
2.3.1 Entstehungsgeschichte der virtuellen Inbetriebnahme	42
2.3.2 Definition, Zielstellung und Vorteile einer virtuellen Inbetriebnahme	44
2.3.3 Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme	46
2.3.4 Durchführung und Aufwand-Nutzen-Betrachtung der virtuellen Inbetriebnahme...	48
2.3.5 Einsatz und Grenzen der virtuellen Inbetriebnahme in der Automobilbranche.....	50
2.4 Produktionsentstehungsprozess mit virtueller Inbetriebnahme.....	52
2.4.1 Einordnung der VIBN in den Produktionssystementstehungsprozess.....	52
2.4.2 Auswirkungen auf die Phasen der Produktionssystementstehung.....	53
3 Stand der Technik in Forschung und Industrie	58
3.1 Gliederung und Fokus	58

3.2 Virtuelle Inbetriebnahme.....	58
3.2.1 Stand der Forschung.....	59
3.2.2 Stand der Industrie	70
3.2.3 Zusammenfassung des Standes der Technik der virtuellen Inbetriebnahme	79
3.3 Cyber-physische Produktionssysteme	82
3.3.1 Stand der Forschung	82
3.3.2 Stand der Industrie	90
3.3.3 Zusammenfassung des Standes der Technik cyber-physischer Produktionssysteme	95
3.4 Virtuelle Inbetriebnahme cyber-physischer Produktionssysteme	99
3.4.1 Stand der Forschung	99
3.4.2 Stand der Industrie	101
3.4.3 Zusammenfassung des Standes der Technik der virtuellen Inbetriebnahme cyber-physischer Produktionssysteme	104
4 Defizite und Handlungsbedarf	106
4.1 Defizite	106
4.2 Handlungsbedarf.....	107
4.3 Präzisierte Zielstellung	108
4.4 Bewertung diskutierter Arbeiten und Ansätze	110
4.5 Abgrenzung dieser Arbeit.....	111

5 Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme	112
5.1 Identifizierung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme	112
5.1.1 Literaturauswahl.....	112
5.1.2 Restriktionen und spezifizierte Literaturanalyse	114
5.1.3 Ergebnisdiskussion der spezifizierten Literaturanalyse.....	116
5.2 Definition und Konkretisierung der Charakteristiken	117
5.2.1 Adaptivität	117
5.2.2 Agilität.....	117
5.2.3 Dezentralität	118
5.2.4 Flexibilität.....	118
5.2.5 Integrierbarkeit.....	122
5.2.6 Interoperabilität	123
5.2.7 Kompatibilität	123
5.2.8 Mobilität	123
5.2.9 Modularität	124
5.2.10 Neutralität.....	124
5.2.11 Rekonfigurierbarkeit.....	124
5.2.12 Robustheit.....	125
5.2.13 Skalierbarkeit	125
5.2.14 Umrüstbarkeit.....	125

5.2.15 Universalität.....	126
5.2.16 Veränderungsfähigkeit	126
5.2.17 Wandlungsfähigkeit	126
5.3 Klassifizierung.....	127
5.3.1 Klassifizierungssysteme	127
5.3.2 Klassifizierungsgliederung und Klassifizierungsebenen	127
5.3.3 Klassifizierungsbestimmung nach Aspekt 1: Definition.....	132
5.3.4 Klassifizierungsbestimmung nach Aspekt 2: Abhängigkeiten	134
5.4 Auswirkungen auf die virtuelle Inbetriebnahme	139
5.5 Zusammenfassung.....	140
 6 Vorgehensmodelle für die virtuelle Inbetriebnahme cyber-physischer Produktionssysteme	 141
6.1 Anwendungskontext	141
6.2 Allgemeines Vorgehensmodell	142
6.2.1 V-Modell	142
6.2.2 Anforderungen an das allgemeine Vorgehensmodell	143
6.2.3 Aufbau des allgemeinen Vorgehensmodells	144
6.2.4 Systementwurfsphase	148
6.2.5 Datenbeschaffung, Datenorganisation und Systemintegrationsphase.....	150
6.3 Virtuelle Inbetriebnahme im allgemeinen Vorgehensmodell	152

6.3.1 Datenbeschaffung und -organisation	152
6.3.2 Modellentstehung	153
6.3.3 Virtuelle Inbetriebnahme	154
6.4 Charakteristik-Auswahl	156
6.4.1 Verständnis von Flexibilität	157
6.4.2 Verständnis von Rekonfigurierbarkeit.....	157
6.4.3 Verständnis von Wandlungsfähigkeit.....	157
6.5 Anforderungen an die charakteristischen Vorgehensmodelle	158
6.6 Vorgehensmodell für flexible Produktionssysteme	159
6.6.1 Systementwurfsphase für flexible Produktionssysteme	159
6.6.2 Datenbeschaffung und -organisation für flexible Produktionssysteme.....	159
6.6.3 Systemintegrationsphase für flexible Produktionssysteme	160
6.6.4 Turbulenzhandhabung in flexiblen Produktionssystemen	162
6.7 Vorgehensmodell für rekonfigurierbare Produktionssysteme	164
6.7.1 Systementwurfsphase für rekonfigurierbare Produktionssysteme	164
6.7.2 Datenbeschaffung und -organisation für rekonfigurierbare Produktionssysteme ..	164
6.7.3 Systemintegrationsphase für rekonfigurierbare Produktionssysteme	165
6.7.4 Turbulenzhandhabung in rekonfigurierbaren Produktionssystemen	167
6.8 Vorgehensmodell für wandlungsfähige Produktionssysteme	169
6.8.1 Systementwurfsphase für wandlungsfähige Produktionssysteme	169

6.8.2 Datenbeschaffung und -organisation für wandlungsfähige Produktionssysteme ...	170
6.8.3 Systemintegrationsphase für wandlungsfähige Produktionssysteme	170
6.8.4 Turbulenzhandhabung in wandlungsfähigen Produktionssystemen	172
6.9 Zusammenfassung.....	174
7 Rahmenwerk.....	175
7.1 Verständnis des Rahmenwerks	175
7.2 Turbulenzen im Umfeld industrieller Produktionssysteme	176
7.2.1 Turbulenzklassifizierung	176
7.2.2 Reaktionsstrategien	177
7.3 Integriertes Vorgehensmodell	182
7.4 Zusammenfassung.....	185
8 Validierung.....	186
8.1 Ziele und Abgrenzung der Validierung.....	186
8.2 Anwendungsfall.....	187
8.2.1 Produktbeschreibung	189
8.2.2 Prozessbeschreibung	189
8.3 Validierung des Rahmenwerks.....	191
8.3.1 Produktionsplanungs- und Reaktionsstrategieszenarien	191
8.3.2 Use-Case A: Einführung neuer Produkte in die flexible Unterbodenmontagelinie .	191

8.3.3 Use-Case B: Rekonfigurierbarkeit in der virtuellen Unterbodenmontage	194
8.3.4 Use-Case C: Wandlungsfähigkeit in der virtuellen Unterbodenmontage	197
8.4 Evaluierung der Validierungsergebnisse.....	200
8.5 Zusammenfassung der Validierung.....	201
9 Zusammenfassung und Ausblick	203
9.1 Zusammenfassung.....	203
9.1.1 Beantwortung der Forschungsfragen	203
9.1.2 Grenzen des Ansatzes	206
9.1.3 Evaluierung der Ergebnisse der Forschungsfragen	207
9.2 Ausblick	208
V. Literaturverzeichnis.....	209
VI. Anhang 5.1	241
VII. Anhang 5.3	253
VIII. Anhang 8.3.2	254
IX. Anhang 8.3.3	256
X. Anhang 8.3.4	259

II. Abkürzungsverzeichnis

CAD	Rechnerunterstütztes Konstruieren (Computer-Aided Design)
CAx	Rechnerunterstützte (Vorgehen, Prozesse, Technologien)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIN EN	Deutsches Institut für Normung, Europäische Norm
DIN EN ISO	Deutsches Institut für Normung / Europäische Norm / International Organization for Standardization
DRM	Design einer Forschungsmethodologie (Design Research Methodology)
GMA	Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik des Vereins Deutscher Ingenieure
HITL	Menschzentrierte Schleifensimulation (Human-In-The-Loop)
Hil	Hardwarezentrierte Schleifensimulation (Hardware-In-the-Loop)
HMI	Mensch-Maschine Schnittstelle (Human-Machine Interface)
IEC	Internationale Elektronische Kommission (International Electrotechnical Commission)
IEEE	Berufsverband aus den Bereichen der Elektro- und Informationstechnik (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
IIWA	Intelligenter industrieller Arbeitsassistent (Intelligent Industrial Work Assistant)
IVBIN	Integrierte Virtuelle Inbetriebnahme
Mil	Modelzentrierte Schleifensimulation (Model-In-the-Loop)
N.N.	Nicht Namentlich bekannt

o. D.	Ohne Datum
o. J.	Ohne Jahr
QFD	Qualitätsfunktionendarstellung (Quality-Function-Deployment)
Sil	Softwarezentrierte Schleifensimulation (Software-In-the-Loop)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
TIA	Totally Integrated Automation
UR	Universal Robots
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VDI EFRA	Arbeitskreis: „Rationalisierung der Inbetriebnahme komplexer Produkte“
VIBN	Virtuelle Inbetriebnahme

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.4-1. Gliederung der Arbeit – Kapitel 1-6.....	8
Abbildung 1.4-2. Gliederung der Arbeit – Kapitel 6-9.....	9
Abbildung 2.1-1. Zusammenhang von Methoden, Methodik und Methodologie.....	13
Abbildung 2.1-2. Hierarchischer Zusammenhang zwischen Zeichen, Daten, Informationen und Wissen in eigener Darstellung basierend auf (<i>Rehäuser & Krcmar, 1996, S. 3-7; North, 2011, S. 37; Hasler Roumois, 2013, S. 43-44</i>).	15
Abbildung 2.1-3. Kernelemente des Bereiches Organisation und Menschen in Anlehnung an (<i>Burr, 2008, S. 22; Bach et al., 2017, S. 28</i>).....	17
Abbildung 2.2-1. Phasen des Produktionsentstehungsprozesses.	34
Abbildung 2.2-2. Phasen der Produktionssystemplanung in Anlehnung an (Bloech et al., 2014, S. 105-107, 147-149, 211-213).....	36
Abbildung 2.2-3. Phasen der Produktionssystementwicklung.	38
Abbildung 2.2-4. Phasen der Produktionssystemrealisierung in Anlehnung an (Weber, 2006; Weber, 2019).	40
Abbildung 2.2-5. Einordnung der Produktionssystementstehung in die Produktentstehung in Anlehnung an (Burr, 2008, S. 33; Bellgran & Säfsten, 2010, S. 5-6; VDI 4499, 2008, S. 10).....	41
Abbildung 2.3-1. Softwareseitige Fehlerentstehung und -beseitigung in programmierten Steuerungsbausteinen in Anlehnung an (Brökelmann, 2015, S. 32; Weck, 2001, S. 151; Oestreicher, 1986, S. 42) und Entwicklung der Änderungskosten in Abhängigkeit vom Änderungszeitpunkt nach (Aßmann, 1998, S. 210).	43
Abbildung 2.4-1. Einordnung der virtuellen Inbetriebnahme in den Produktions- entstehungsprozess in Anlehnung an (Bröckelmann, 2015, S. 82, 135-138) ..	53
Abbildung 2.4-2. Auswirkungen der virtuellen Inbetriebnahme auf den Zeitpunkt der Fehler- beseitigung, basierend auf den Darstellungen nach (Brökelmann, 2015, S. 32; Weck, 2001, S. 151; Oestreicher, 1986, S. 42; Aßmann, 1998, S. 210)...	55

Abbildung 2.4-3. Auswirkungen der virtuellen Inbetriebnahme auf die Phasen der Produktionssystementstehung, adaptierte Darstellung nach (Griesbach et al., 2004, S. 4-20; Ehrenstraßer, 2006, S. 6-13).....	56
Abbildung 5.1-1. Flussdiagramm des Literaturauswahlprozesses zur Bestimmung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme nach (DIN 66001:1983-12).....	113
Abbildung 5.3-1. Matrix der Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.	136
Abbildung 6.2-1. Perspektivenorientierte Darstellung des allgemeinen Vorgehensmodells....	145
Abbildung 6.2-2. Ebenen-orientierte Darstellung des allgemeinen Vorgehensmodells.	150
Abbildung 6.3-1. Ebenen-orientierte Darstellung des allgemeinen Vorgehensmodells infolge einer Produktionsneuplanung und einer integrierten virtuellen Inbetriebnahme.	155
Abbildung 6.6-1. Beispielhafte Darstellung einer virtuellen inbetriebnahme-gerechten Prozesszerlegung mit dedizierter Operations-Ressourcen-Produktstrukturzuordnung für flexible Produktionssysteme.....	161
Abbildung 6.6-2. Turbulenzhandhabung in flexiblen Produktionssystemen.....	163
Abbildung 6.7-1. Beispielhafte Darstellung einer virtuellen Inbetriebnahme-gerechten Prozesszerlegung mit konfigurationsbasierter Operations- und Ressourcenzuordnung für rekonfigurierbare Produktionssysteme.	166
Abbildung 6.7-2. Turbulenzhandhabung in rekonfigurierbaren Produktionssystemen.	168
Abbildung 6.8-1. Beispielhafte Darstellung einer virtuellen inbetriebnahme-gerechten Prozesszerlegung mit modulbasierter Operations- und Ressourcenzuordnung für wandlungsfähige Produktionssysteme.	171
Abbildung 6.8-2. Turbulenzhandhabung in wandlungsfähigen Produktionssystemen.	173
Abbildung 7.2-1. Veränderungstiefen der Reaktionsstrategien.	181
Abbildung 7.3-1. Rahmenwerk zur virtuellen Inbetriebnahme cyber-physischer Produktionen.	184

Abbildung 8.2-1. Reale Unterbodenmontagelinie in (Scholer, 2018, S. 162).	187
Abbildung 8.2-2. Virtuelle Unterbodenmontagelinie.	188
Abbildung 8.2-3. Beispiele von Verkleidungselementen am Fahrzeugunterboden in (Scholer, 2018, S. 124).	189
Abbildung 8.2-4. Draufsicht der Unterbodenmontagelinie mit Untergliederung des Unter- bodenmontageprozesses in vier Schritten und ohne Tragwerkdarstellung. .	190
Abbildung 8.3-1. Einführung einer neuen Unterbodenverkleidung durch logische Änderungen auf der Prozess- und Operationsebene in der virtuellen Unterbodenmontagelinie.	192
Abbildung 8.3-2. Flexibilität als Reaktionsstrategie infolge der Einführung eines neuen Produktes in die existierende Unterbodenmontagelinie.	193
Abbildung 8.3-3. Zwillingsmontage der Verkleidung V(A) in Schraubkonfiguration.	194
Abbildung 8.3-4. Zwillingsmontage der Unterbodenverkleidung V(C) in Pinning- Konfiguration.	195
Abbildung 8.3-5. Rekonfiguration als Reaktionsstrategie infolge der Einführung einer mehrteiligen Unterbodenverkleidung in die virtuelle Unterboden- montagelinie.	196
Abbildung 8.3-6. Wandlungsfähigkeit als Reaktionsstrategie infolge eines Skalierungs- bedarfs der Schraubprozesse in der virtuellen Unterbodenmontagelinie....	197
Abbildung 8.3-7. Wandlungsfähigkeit als Reaktionsstrategie auf den Bedarf an neuen Prozessen durch initial ungeplante Produkte in die modulare System- struktur der virtuellen Unterbodenmontagelinie.....	198
Abbildung 8.3-8. Wandlungsfähigkeit als Reaktionsstrategie infolge von Produkt- änderungen.....	199

IV. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.3-1. Nutzen und Aufwand einer virtuellen Inbetriebnahme mit Ergänzungen nach (Lindworsky, 2011, S. 46)	49
Tabelle 3.2-1. Stand der virtuellen Inbetriebnahme in Forschung und Industrie.....	81
Tabelle 3.3-1. Auswirkungsindex cyber-physischer Produktionssysteme.	97
Tabelle 3.3-2. Stand der Technik in Forschung und Industrie im Kontext cyber- physischer Produktionssysteme.	98
Tabelle 3.4-1. Stand der Technik in Forschung und Industrie für Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen.	105
Tabelle 4.4-1. Bewertung diskutierter Arbeiten und Ansätze in Bezug auf die Erfüllung der Forschungsfragen.....	110
Tabelle 5.1-1. Spezifizierte Literaturanalyse.....	115
Tabelle 5.2-1. Definitionen der Flexibilität (F) in Bezug zur Produktionssystemänderung nach der Produktionsentwicklungsphase.....	122
Tabelle 5.3-1. Vergleich von Klassifizierungsgliederungen und Klassifizierungsebenen.....	131
Tabelle 5.3-2. Klassifizierung nach Aspekt 2: Abhängigkeiten.....	137
Tabelle 5.3-3. Klassifizierung der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.....	138
Tabelle 5.4-1. Charakteristiken mit potentieller Auswirkung auf die virtuelle Inbetriebnahme.....	139
Tabelle 7.2-1. Szenarien-basierte Produktänderungen.	178
Tabelle 8.3-1. Gliederung der zu validierenden Reaktionsstrategien.....	191
Tabelle 9.1-1. Ampelsystem-orientierte Evaluierung über die Erfüllung der Beantwortung der Forschungsfragen.	207

1 Einleitung

Kapitel eins erläutert den Hintergrund der Arbeit und leitet, aufbauend auf den identifizierten Herausforderungen, die Zielsetzung dieser Arbeit ab. Anschließend werden das Verständnis des wissenschaftlichen Arbeitens sowie die Vorgehensweise und der Aufbau der Arbeit dargelegt.

1.1 Ausgangssituation

Wie in der Vergangenheit wird auch in Zukunft das herzustellende Produkt die an die Produktionssysteme gestellten Anforderungen in Form und Funktionalität bestimmen. Besondere Anforderungen werden an produzierende Unternehmen vor allem durch den Wunsch der Konsumenten¹ nach neuen, individuellen und schnellstmöglich verfügbaren Produkten gestellt (*Bauernhansl & Miehe, 2020, S. 22*). Die Konsequenz dieser Wünsche ist eine steigende Produktvarianz bei gleichzeitig kürzeren Produktentstehungszyklen und hat direkte Auswirkungen auf die Ausrichtung und Entstehung der Produktionen. Denn die Einführung neuer Produkte oder neuer Varianten bestehender Produkte führt zwangsläufig zu der Fragestellung inwiefern die bestehende oder zukünftige Produktion des Unternehmens gestaltet sein muss, um die industriellen Erzeugnisse zu produzieren. Daher ist eine Produktionsstrategie, in der festgelegt wird, wie die herzustellenden Produkte in kürzester Zeit, zu geringen Kosten und in einer hohen Qualität am Markt angeboten werden können, für den Erfolg eines Unternehmens entscheidend (*Westkämper & Löffler, 2016, S. 38-39*).

Ein wesentlicher Aspekt für eine erfolgreiche Produktionsstrategie in einem Umfeld mit immer kürzeren Produktentstehungszyklen ist die Sicherung der „Anpassungsfähigkeit“ der Produktion. Eine anpassungsfähige Produktion erhöht die unternehmensseitige Reaktionsfähigkeit auf Veränderungen an globalen Märkten (*Westkämper & Löffler, 2016, S. 50*). Die Veränderungen an globalen Märkten können durch die Verschmelzung von Industriezweigen, die intensivere Einbindung von Kunden während der Produktplanung oder durch technologische Neuerungen hervorgerufen werden (*Soder, 2017, S. 16*). Letzteres fördert die Realisierung der Anpassungsfähigkeit und gilt als ein zentrales Element, um den zukünftigen Herausforderungen

¹ Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung einer männlichen, weiblichen und diversen (m/w/d) Sprachform verzichtet. Dennoch gelten personenbezogene Bezeichnungen gleichermaßen für alle Geschlechter in dieser Arbeit.

im Handlungsfeld der Produktion zu begegnen. Besonders seit der Einführung des Begriffs der vierten industriellen Revolution in 2011 wird der Fokus verstärkt auf die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien gesetzt (*Kagermann et al., 2011, S. 2*).

Als ein wesentlicher „*Enabler*“, zur Umsetzung der vierten industriellen Revolution, gilt der Einsatz von cyber-physischen Systemen in der Produktion. Unter dieser Systemgeneration wird die Nutzung intelligenter Maschinen, Lagersystemen und Betriebsmittel verstanden, die entlang der Bereiche der Ein- und Ausgangslogistik, Produktion, Marketing und Service über Kommunikationsnetzwerke miteinander interagieren können (*Kagermann et al., 2013, S. 18*; siehe auch *Kapitel 3.3*).

Der Übergang von konventionellen Lösungen der Automatisierungstechnologie zu cyber-physischen Produktionssystemen ist jedoch in der Industrie mit großen Unsicherheiten verbunden. Zum einen fehlt das Verständnis für die Charakterisierung der neuen komplexen Technologie (*Ribeiro & Björkman, 2017, S. 3816-3827*), zum anderen bestehen technologische Unsicherheiten vor allem bei der Vorstellungskraft einer möglichen strategischen Umsetzung (*Fechtel peter et al., 2019, S. 7*). Weitere Zurückhaltungen bei der Umsetzung in die Praxis ergeben sich durch die mit der Integration der neuen Systeme verbundenen Startinvestitionen (*Lager, 2020, S. 111-113*) oder einen erhöhten Bedarf an Testphasen in verschiedenen Konfigurationen, besonders während der Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen (*Huber, 2016, S. 44*).

Um diesen Hemmnissen entgegenzuwirken sowie eine erfolgreiche industrielle Einführung von cyber-physischen Produktionssystemen zu unterstützen, werden in einer Stellungnahme des Fachausschusses „*Cyber-physical Systems*“ der VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) Handlungsempfehlungen formuliert. Diese sehen neben der Notwendigkeit der Begriffsklärung und der Automatisierung als Leitdisziplin für die Realisierung von cyber-physischen Produktionssystemen vor allem die Entwicklung von Methoden für die Systemplanung und Systementwicklung vor (*Bettenhausen & Kowalewski, 2013, S.7*). Aus Sicht der Forschung werden diese Handlungsfelder um den Aspekt der Simulation ergänzt, die ein Schlüsselfaktor für die industrielle Einführung von cyber-physischen Systemen in der Produktion sein kann (*Reinhart et al., 2013, S. 87; Leitão et al., 2016, S. 23; Zeman et al., 2016, S. 533*).

Denn die Nutzung von Simulationen ist im Umfeld der Produktion immer dann sinnvoll, wenn

„komplexe Wirkzusammenhänge die menschliche Vorstellungskraft überfordern, das Experimentieren am realen System nicht möglich bzw. zu kostenintensiv ist und das zeitliche Ablaufverhalten einer Anlage untersucht werden soll“ (ASIM, 1997, S. 6; Wenzel et al., 2007, S. 14-16).

Diese Definition über Voraussetzungen zur Feststellung der Simulationswürdigkeit eines Sachverhaltes oder eines Produktionssystems deckt sich mit den Herausforderungen und den Umsetzungshemmissen, die im Zusammenhang mit der industriellen Einführung von cyber-physischen Produktionssystemen geschildert werden. In einer schriftlichen Befragung von 29 Mitarbeitern innerhalb der Planung einer industriellen Produktion geben über 95% der Befragten an, dass sie einen Einsatz von Simulationen und Simulationswerkzeugen zur Gestaltung der Planungsabläufe mindestens für wichtig halten (Schauf, 2016, S. 144). Einen stark steigenden Bedarf sehen die Teilnehmer einer Trendbefragung des Verbands Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) vor allem in der Anwendung einer virtuellen Inbetriebnahme (Reimann & VDMA, 2017, S. 13).

Eine virtuelle Inbetriebnahme dient während einer Produktionsentwicklung dem simulationsbasierten Testen von Komponentenfunktionalitäten und Validieren des Systemverhaltens eines zukünftig existierenden Produktionssystems. Die virtuelle Inbetriebnahme bietet damit eine interdisziplinäre Betrachtungsmöglichkeit von Produktionssystemen in einer experimentierbaren Simulationsumgebung ohne die Notwendigkeit real vorhandener Anlagenkomponenten. Die sich hieraus ergebenden Nutzenpotenziale für den Anwender gelten als unumstritten und führen dazu, dass die virtuelle Inbetriebnahme zu einem der Hauptinteressen im Bereich der simulationsbasierten Validierungswerkzeuge in der Industrie geworden ist (Kiefer, 2007, S. 43; Weyer et al., 2016, S. 99).

In weiten Teilen der Industrie ist der Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme ein Bestandteil des Produktionsentstehungsprozesses und soll in Zukunft zum Standard im Maschinenbau und in der Automatisierungstechnik werden (*machiningeering GmbH & Co. KG & Wünsch, 2020*). Anknüpfend an diese Ausgangssituation wird nachfolgend die Zielstellung dieser Arbeit formuliert.

1.2 Zielsetzung

Damit die virtuelle Inbetriebnahme in Zukunft als ein Standard etabliert werden kann, ist zu untersuchen, wie zukünftig eingesetzte cyber-physische Produktionssysteme innerhalb des Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden können. Zudem wünscht sich die produzierende Industrie für einen Einsatz von cyber-physischen Produktionssystemen Klarheit in der Begrifflichkeit und den Auswirkungen auf konventionelle, nicht cyber-physische, Produktionen.

Ein weiteres Bedürfnis aus Sicht der Industrie sind Umsetzungsstrategien in Form von projektübergreifend anwendbaren Vorgehensempfehlungen. In der Forschung und Industrie herrscht zudem ein einheitlicher Konsens darüber, dass die Verwendung von Simulationen und Simulationswerkzeugen eine Möglichkeit zur weiteren Erarbeitung bisher nicht industriell etablierter Technologien sein kann.

Darauf aufbauend verfolgt diese Arbeit, die übergeordnete Zielstellung zu untersuchen, ob und in welcher Art und Weise die virtuelle Inbetriebnahme als Simulations- und Validierungswerkzeug dazu beitragen kann, auch zukünftig eingesetzte Technologien wie cyber-physische Produktionssysteme bereits während der Produktionsentwicklung zu berücksichtigen. Dazu ist zunächst zu untersuchen, wie cyber-physische Produktionssysteme beschrieben und in das Handlungsfeld der Produktion eingeordnet werden können. Daran anknüpfend kann untersucht werden, welche Auswirkungen cyber-physische Produktionssysteme auf die virtuelle Inbetriebnahme haben. Auf dieser Basis kann analysiert werden, in welcher Tiefe cyber-physische Produktionssysteme innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme abgebildet werden können und welche Möglichkeiten für die Ausarbeitung von projektübergreifend anwendbaren Vorgehensempfehlungen bestehen, um die produzierende Industrie auf dem Weg zur industriellen Einführung von cyber-physischen Produktionssystemen zu unterstützen. Auf dieser Basis wird zusammenfassend die nachfolgende übergeordnete Forschungsfrage dieser Arbeit abgeleitet.

Forschungsfrage: „Wie verändert sich die virtuelle Inbetriebnahme durch den Einsatz cyber-physischer Produktionssysteme?“

1.3 Verständnis wissenschaftlichen Arbeitens

Das wesentliche Werkzeug wissenschaftlichen Arbeitens ist die Forschung. Nach (*Hult, 1996, S. 1*) liegt der Grundgedanke der Forschung darin, das eigene Wissen und Verständnis über einen Sachverhalt durch systematische Untersuchungen zu fördern. Einen Ansatz zur systematischen Untersuchung wissenschaftlicher Fragestellungen liefern (*Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 14–17*), in Form einer Design Research Methodologie (DRM), welche auch in dieser Arbeit verwendet und nachfolgend stark zusammengefasst erläutert wird. Das DRM-Rahmenwerk ist in die vier Phasen „*Research Clarification, Descriptive Study I, Prescriptive Study*“ und „*Descriptive Study II*“ unterteilt.

In der ersten Phase, *Research Clarification*, ist das Forschungsziel zu definieren, indem beweiskräftige Indikatoren für eine Annahme oder eine These identifiziert werden können. Darauf aufbauend können zunächst eine Zusammenfassung der Ausgangssituation erarbeitet und anschließend Kriterien zur Bewertung von Ergebnissen innerhalb der Forschungsunternehmung definiert werden. (*Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15*)

Die zweite Phase, *Descriptive Study I*, erlaubt Forschern nun eine Spezifizierung der Beschreibung zur Erreichung des Forschungsziels. Unterstützung erfahren die Forscher dabei durch eine dem Forschungsziel angepasste Ausrichtung der Literaturrecherchen und die daraus resultierenden Einflussfaktoren, die während der Forschungsunternehmung entscheidenden Einfluss auf Bewertungen nehmen können. (*Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 15-16*)

Die dritte Phase, *Prescriptive Study*, erlaubt den Forschern nun, ausgehend von ihrer spezifizierten Beschreibung des Ist-Zustandes, aus Phase zwei den gewünschten Zustand entsprechend anzugeleichen. Die Transformation vom analysierten Zustand in den gewünschten Zustand wird durch die Berücksichtigung der identifizierten, teilweise auch variierenden Einflussfaktoren, die in verschiedenen untersuchten Szenarien identifiziert werden, erreicht und als entwicklungsunterstützender Ansatz in Form von Methoden erarbeitet. (*Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 16*)

In der vierten Phase, *Descriptive Study II*, werden die erarbeiteten Ansätze sowie Methoden aus Phase drei auf ihre Eignung, inwiefern sie dazu beitragen können, den gewünschten definierten Zustand zu erreichen, geprüft. Der Umfang der Überprüfung kann von einer einzelnen

funktionalen Validierung bis hin zur Durchführung mehrerer Studien reichen. Bei Nichterfüllung eines gewünschten Zustandes kann eine Anpassung, innerhalb der vorgelagerten Phasen, zum Erfolg führen, weshalb zwischen den Phasen iterative Anpassungen erfolgen können. (*Blessing & Chakrabarti, 2009, S. 16-17*)

1.4 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit untergliedert sich in neun Kapitel und ist in *Abbildung 1.4-1 und Abbildung 1.4-2*, unter Berücksichtigung der Phasen der Design Research Methodologie aus *Kapitel 1.3*, dargestellt.

Das **zweite Kapitel** definiert wesentliche Termini für ein einheitliches Verständnis der Arbeit. Im weiteren Verlauf des zweiten Kapitels werden die Prozesse der Produktionsentstehung und der virtuellen Inbetriebnahme erläutert und abschließend zueinander in Beziehung gesetzt.

Die Darstellung des Standes der Technik in Forschung und Industrie in **Kapitel drei** beinhaltet einen Einblick in aktuelle und zurückliegende Arbeiten, die sich mit der virtuellen Inbetriebnahme oder cyber-physischen Produktionssystemen befassen. Eine Betrachtung von Arbeiten, die die Themengebiete virtuelle Inbetriebnahme und cyber-physische Produktionssysteme kombiniert untersuchen, schließt Kapitel drei ab.

Das **vierte Kapitel** nutzt die in Kapitel drei gewonnenen Erkenntnisse zur Formulierung von Defiziten und formuliert auf dieser Basis einen Handlungsbedarf, der inhaltlich die Zielsetzung aus Kapitel eins präzisiert. Um den Fokus der Arbeit zu verdeutlichen, schließt das Kapitel mit einer Abgrenzung der Arbeit gegenüber verwandten Themengebieten ab.

Im **fünften Kapitel** werden, als Resultat des formulierten Handlungsbedarfs, cyber-physische Produktionssysteme eingehender betrachtet. Ziel dieses Kapitels ist es darzustellen, wie sich cyber-physische Produktionssysteme beschreiben lassen, um entscheiden zu können, welche Systembereiche sich mittels virtueller Inbetriebnahme funktional validieren lassen.

Kapitel sechs umfasst methodische Ansätze zur Vorbereitung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme zur Verifikation und Validierung cyber-physischer Produktionssystem-

charakteristiken. Den Kern dieses Kapitels bildet die Erarbeitung von Vorgehensmodellen, die die Prozesse der Verifikation und Validierung systematisch strukturieren.

Im **siebten Kapitel** wird ein Rahmenwerk vorgestellt, das die in Kapitel sechs vorgestellten Vorgehensmodelle bündelt und als Gesamtvorgehensmodell zur Verifikation und Validierung cyber-physischer Produktionssysteme organisiert.

Das **achte Kapitel** dient der kritischen Validierung der erarbeiteten Vorgehensmodelle. Dazu werden beispielhafte Szenarien entwickelt und in einem industrienahen virtuellen Forschungsumfeld bewertet.

Die erzielten Ergebnisse werden im **neunten Kapitel**, im Rahmen einer Zusammenfassung und im Kontext zu den definierten Forschungsfragen, kritisch bewertet. Ein Ausblick als Vorschlag für zukünftige auf diesem Thema aufbauende Arbeiten schließt das neunte Kapitel der Arbeit ab.

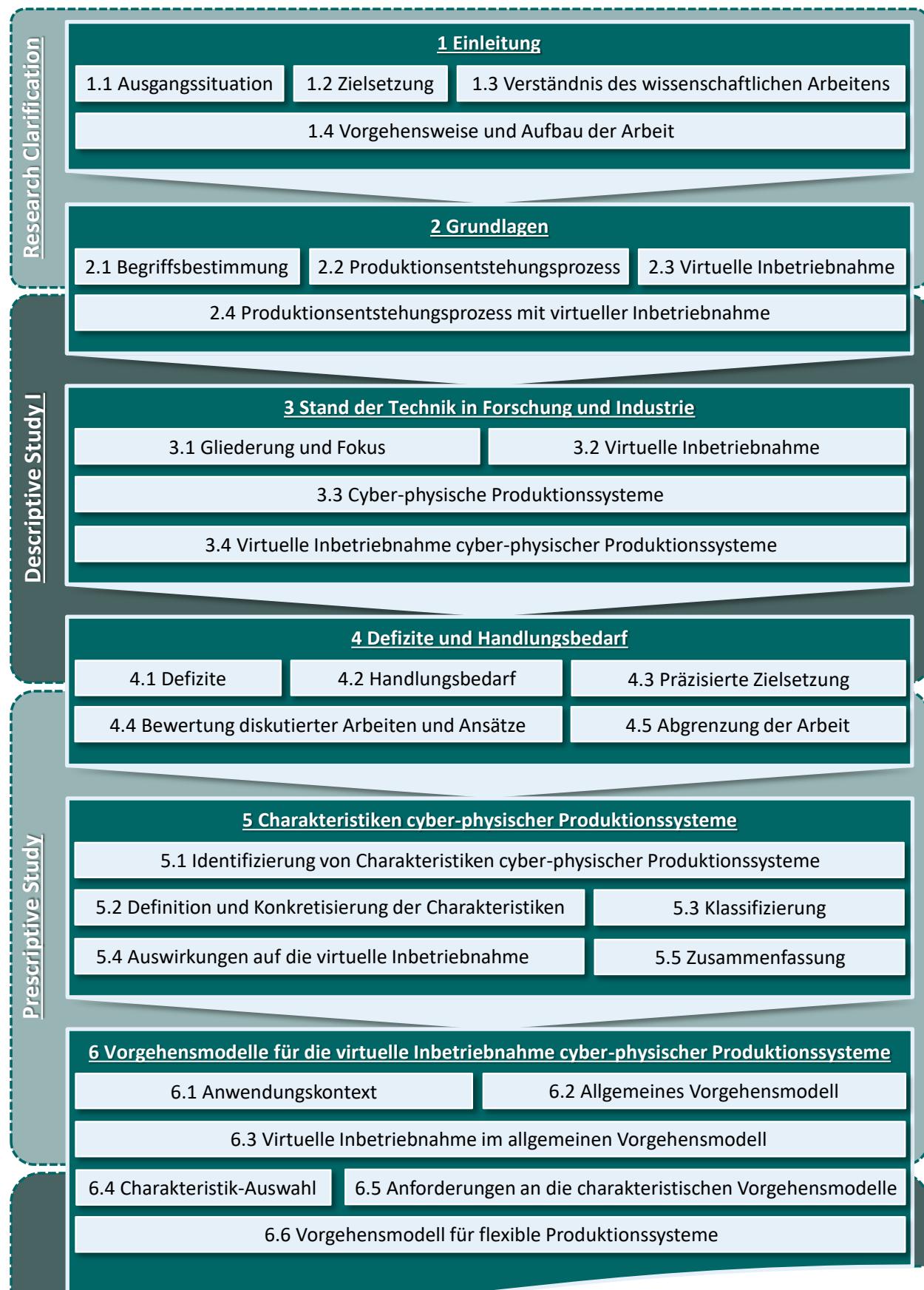


Abbildung 1.4-1. Gliederung der Arbeit – Kapitel 1-6.

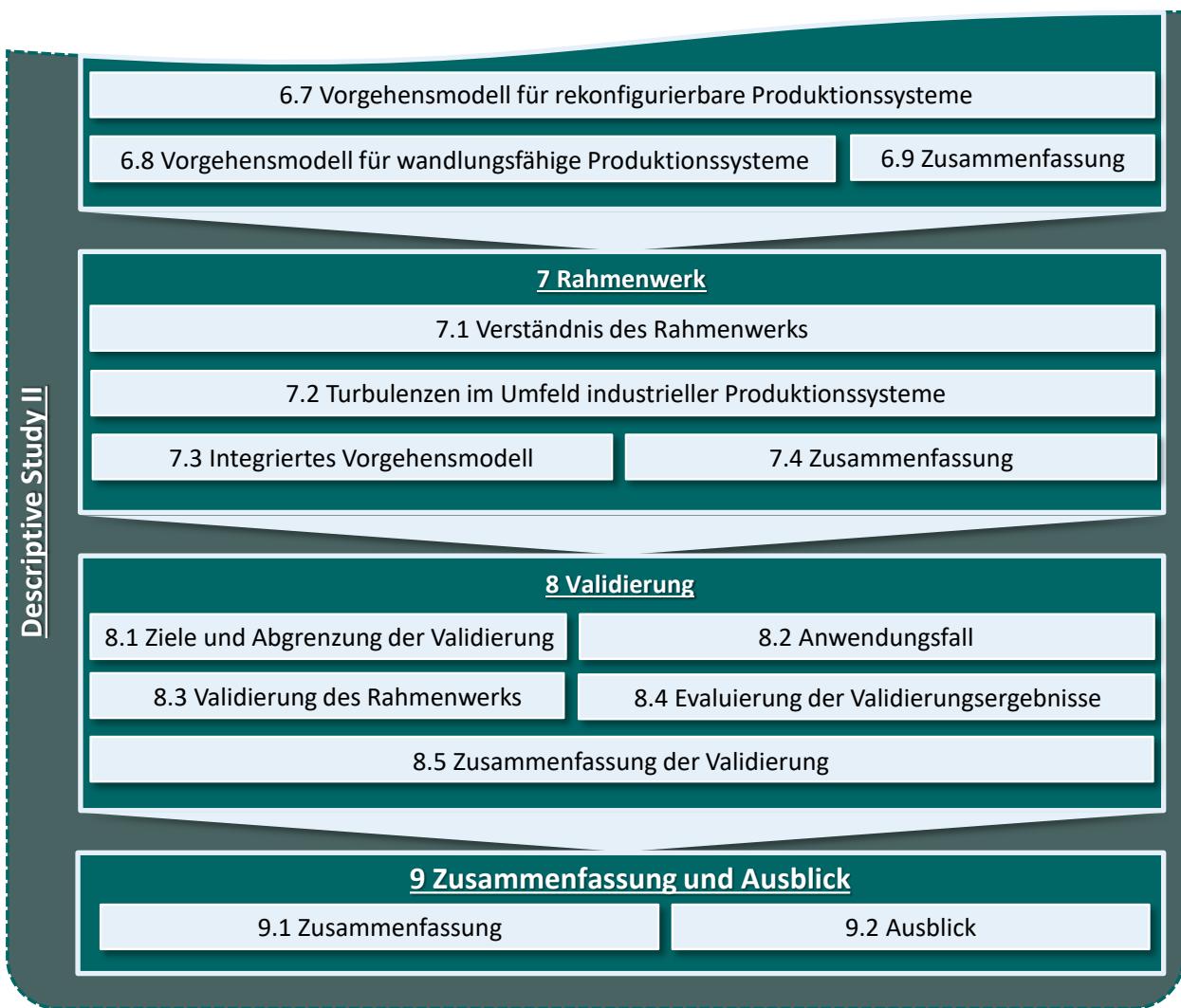


Abbildung 1.4-2. Gliederung der Arbeit – Kapitel 6-9.

2 Grundlagen

Kapitel zwei verfolgt die Zielstellung, wesentliche Begriffe für die Arbeit inhaltlich zu erläutern und darauf aufbauend Definitionen zu formulieren, die im Kontext der Zielstellung aus *Kapitel 1* für diese Arbeit und aus Sicht des wissenschaftlichen Arbeitens relevant erscheinen.

2.1 Begriffsbestimmung

2.1.1 Methode, Methodik, Methodologie

Ein wesentlicher Aspekt dieser Arbeit wird die Ausarbeitung von Methoden und deren Bündelung in einer Methodologie sein, weshalb die Begrifflichkeiten nachfolgend definiert, voneinander abgegrenzt und gegenüber dem Begriff Methodik eingeordnet werden.

In der Forschung und Lehre werden die Begrifflichkeiten Methode, Methodik und Methodologie häufig nicht eindeutig voneinander abgegrenzt. Die Gründe hierfür finden ihren Ursprung zum einen in sprachlichen Barrieren, da keine eindeutige Übersetzung des Begriffs Methodik in die englische Sprache existiert, sondern vielmehr durch den englischen Begriff für Methodologie (*methodology*) ersetzt und somit im deutschen Sprachgebrauch synonym verwendet wird (*Oswald, 2006; Hornby, 2000, S.803*). Zum anderen besteht ein heterogenes Verständnis der einzelnen Begriffe, weshalb durch Verallgemeinerungen, besonders bei fachübergreifenden Anwendungen, ein missverständlicher oder unzureichend genauer Gebrauch entsteht (*Winko, 2007, S. 586; Beer, 2006, S. 9; Geldsetzer, 1980, S. 1379*). Deshalb werden nachfolgend die Begriffe Methode, Methodik und Methodologie für ein einheitliches Verständnis in dieser Arbeit und aufbauend auf ihren Definitionen voneinander abgegrenzt und anschließend in einen gemeinschaftlichen Kontext zu den Begriffen Prozess, Organisation, Menschen, Wissen und Vorgehensmodelle gesetzt.

In der Sprachwissenschaft (Etymologie) wird unter einer **Methode** „*das Nachgehen, Weg oder Gang einer Untersuchung*“, oder der „*Weg zu etwas hin*“ verstanden (*Duden Online Methode, o. J.*). Die (*DIN EN ISO 14001:2015-11, 2015, S. 36*) nutzt Methoden, als eine Möglichkeit der „*Analyse und Bewertung*“ innerhalb eines spezifischen Aufgabenkontextes, um „*gültige Ergebnisse sicherzustellen*“ oder, nach (*VDI 2221-1, 1993, S. 33; VDI 2222-1, 1997, S. 22*),

zumindest ein grob bekanntes Ziel, beispielsweise in Form von technischen Systemen, Produkten oder Projekten, zu erreichen (vgl. Schmidt, 2002, S. 136-138). In der Literaturwissenschaft sind nach (Winko, 2007, S. 581) folgende Voraussetzungen zur Erfüllung der Terminologie *Methode* zu gewährleisten:

- Einbettung der Untersuchung in einen systematischen Theoriezusammenhang;
- Sicherstellung der Formulierbarkeit von Vorschriften zur Abfolge festgelegter Schritte;
- Dokumentierte Schritte und daraus resultierende Ergebnisse müssen wiederholbar sein.

Diese Ansicht teilt (Hammerschall, 2008, S. 57) und definiert die Methode als eine „*dokumentierte Handlungsanweisung*“, zum Ziele der Erfüllung einer „*wiederholbaren und nachvollziehbaren Lösung ... einer spezifischen Fragestellung*“, wobei zusätzlich detaillierte Aussagen zur Generierung „*aller notwendigen (Zwischen-) Ergebnisse*“ überliefert werden. Weiter formuliert (Obrecht, 2007, S. 7) eine wissenschaftliche Methode als eine „*Bearbeitung kognitiver Probleme*“, indem ausschließlich die „*elementarsten Operationen als eine Abfolge von Schritten*“ zur Erarbeitung der Lösung dienen.

Im Bereich der Informatik ist nach (Burr et al., 2007, S. 4) der Begriff Methode dem Begriff Prozess, zur Beschreibung dessen inhaltlicher Aktivitäten, unterzuordnen und durch Informationen sowie Daten anzureichern, um eine Entscheidungsgrundlage zu erzielen. Aufbauend auf den Recherchen wird die für diese Arbeit geltende *Definition D2.1-1* gewählt.

Definition D2.1-1:

Eine **Methode** ist eine systematische Vorgehensweise zur zielgerichteten Lösung vordefinierter (Teil-) Problemstellungen durch Anwendung zweckmäßiger aufeinander aufbauender Schritte.

Die **Methodik** beschreibt in der Etymologie die „*Kunst des planmäßigen Vorgehens*“ (Duden Online Methodik, o. J.). Aus Sicht der Softwareentwicklung definiert (Chroust, 1992, S. 51; N. N., 1892, S. 533) die Methodik als eine „*Anweisung zur methodischen und zweckmäßigen Lösung einer wissenschaftlichen Aufgabe*“. Weiter spezifiziert (Winko, 2007, S. 586) den Begriff Methodik als ein „*Set methodischer Regeln*“, die dazu dienen fachspezifische Arbeitstechniken zu

vermitteln. Bestärkt wird diese Sichtweise durch (Siebert, 2010, S. 12), der in einer anwendungsorientierteren Beschreibung die Methodik als eine organisierte Gestaltung von „*Lehr- und Lernsituationen*“ unter Beachtung verschiedener Einflussfaktoren, wie Methoden, Teilnehmende, institutionelle Rahmenbedingungen sowie Ziele und Inhalte, definiert. Dieser Einordnung folgt diese Arbeit und wählt auf dieser Basis die *Definition D2.1-2* zur Beschreibung einer Methodik.

Definition D2.1-2:

Die **Methodik** beschreibt die Organisation und Verwendung geeigneter Ressourcen zur Bearbeitung von Methoden und methodenübergreifenden Modellen mit dem Ziel der Vermittlung von Bildung und Wissen (vgl. Siebert, 2010, S. 10).

Der Begriff **Methodologie** bezeichnet die „*Lehre*“ oder die „*Theorie der wissenschaftlichen Methoden*“ (Winko, 2007, S. 585; Duden Online Methodologie, o. J.). In der Literaturwissenschaft und Etymologie wird die Methodologie als eine Quelle der Wissensanreicherung definiert, mit dem Ziel der Fähigkeit eine oder mehrere Methoden aus einer Methodenmenge, unter Berücksichtigung spezifizierter Kriterien, beispielsweise der besonderen Eignung einer Methode gegenüber anderen Methoden, für den gewünschten Prozess auszuwählen und einzusetzen (Beer, 2006, S. 9; Winko, 2007, S. 585; Kamitz, 1980, S. 429). Aufbauend auf den Recherchen und Erkenntnissen wird nachfolgend die *Definition D2.1-3* zur Beschreibung einer Methodologie vorgeschlagen und innerhalb dieser Arbeit verwendet.

Definition D2.1-3:

Eine **Methodologie** umfasst die Lehre der Wahl und Nutzung von wissenschaftlichen Methoden aus einer Methodenmenge entsprechend ihrer Anwendungseignung auf Basis allgemeingültiger Bewertungskriterien.

Die Erarbeitung und anwendungsgerechte Verwendung von Methoden durch den Anwender basieren auf dessen Organisation und seines zur Verfügung stehenden Wissens. Die Beziehungen

dieser zusätzlich zu betrachtenden Ebenen werden in *Abbildung 2.1-1* schematisch kontextualisiert. Neben der Darstellung des Zusammenwirkens von Methoden, Methodik und Methodologie besteht die *Abbildung 2.1-1* aus den weiteren Hauptbereichen Ressourcen, Menschen und Organisation sowie dem Bereich Wissen.

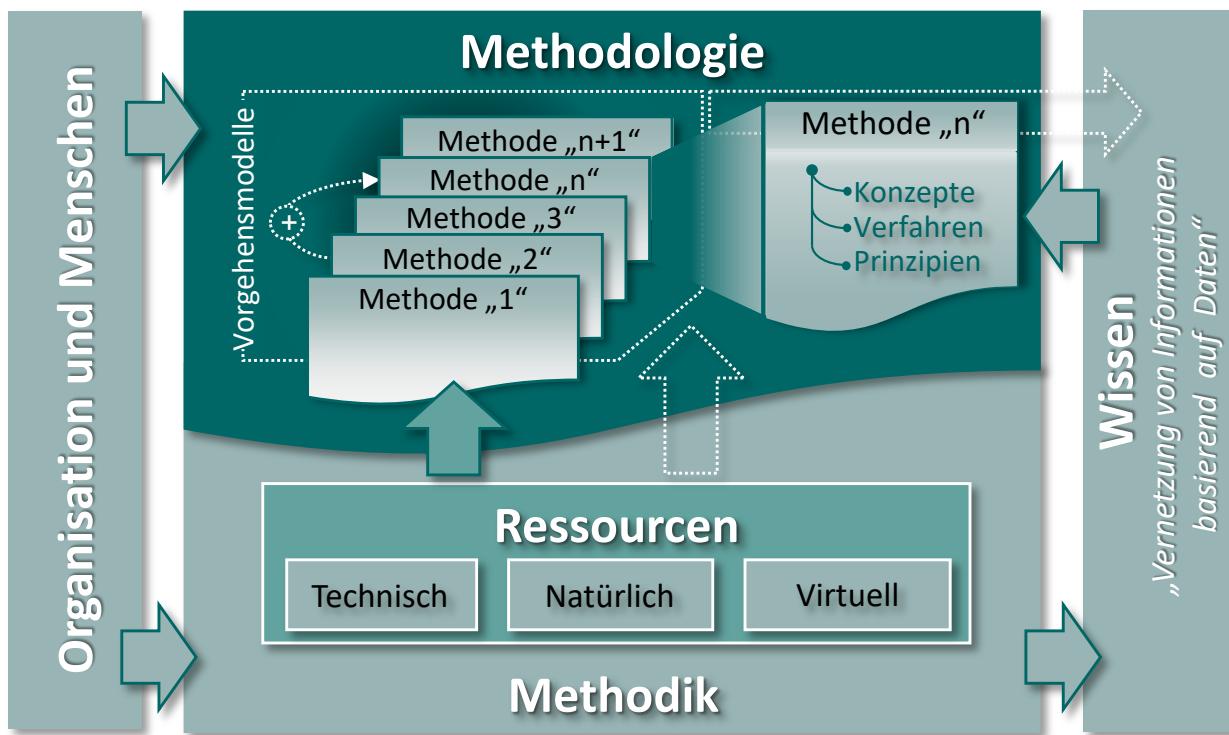


Abbildung 2.1-1. Zusammenhang von Methoden, Methodik und Methodologie.

Die konkreten Inhalte der Hauptbereiche Ressourcen, Menschen und Organisationen sowie Wissen werden nachfolgend vorgestellt. Darüber hinaus folgen die Beschreibungen der den Hauptbereichen untergeordneten Begriffen der Vorgehensmodelle, Konzepte, Verfahren und Prinzipien.

Als **Ressource** wird nach (*Duden Online Ressource*, o. J.) der „natürlich vorhandene Bestand“ von Mitteln verstanden, die zu einem beliebigen Zeitpunkt und Zweck für den Ressourcenverwender zugänglich und verfügbar sind. Nach (*Voigt et al., 2018*) wird diese Definition aus Sicht der Produktionstechnik weiter spezifiziert, indem Ressourcen als „*Mittel, die in die Produktion von Gütern und Dienstleistungen eingehen*“ definiert werden. Dieser Definition folgt auch diese Arbeit aufgrund des Handlungsspielraums der Produktion und gliedert als Erweiterung den Ressourcenbegriff in die drei Unterkategorien der technischen, natürlichen und virtuellen Ressourcen.

Technische Ressourcen umfassen in dieser Arbeit den vorhandenen Bestand von technologiebasierenden Mitteln, die zur Erlangung des definierten Unternehmenszieles in die Produktion einfließen.

Natürliche Ressourcen umfassen jede Ressource, deren Ursprung auf einen natürlichen Organismus zurückzuführen ist und somit neben Mitarbeitern der Produktion auch Rohstoffe aus der Umwelt, Qualität und Größe der zur Verfügung stehenden natürlichen Fläche oder die Versorgung von Luft und Wasser beinhaltet (*Hornby, 2000, S. 1087; VDI 4800-1, 2016, S. 13-14*).

Virtuelle Ressourcen sind modellbasierte, nicht physisch vorhandene Nachbildungen realer Ressourcen, die zur Entwicklung der Produktion dazu verwendet werden, zukünftige Produktionszustände zu evaluieren, um repräsentative Aussagen als Entscheidungsgrundlage zu erzielen, ohne die Notwendigkeit der Verwendung realer Ressourcen vorauszusetzen. Entsprechend der Erkenntnisse, hinsichtlich des Ressourcenbegriffs, wird das Verständnis einer Ressource in dieser Arbeit zusammenfassend als *Definition D2.1-4* vorgeschlagen.

Definition D2.1-4:

Eine **Ressource** ist ein vorhandener und zu jeder Zeit zugänglicher Bestand an technischen, natürlichen oder virtuellen Mitteln, die in die Produktion von Gütern oder Dienstleistungen eingehen (vgl. *Voigt et al., 2018*).

Der Bereich **Wissen** setzt sich aus Datenkombinationen zusammen, die, verknüpft durch einen gemeinsamen Kontext, als Informationen genutzt und durch Vernetzung schließlich zu Wissen angereichert werden können (*Greitemann, 2016, S. 3; North, 2011, S. 37; Rehäuser & Krcmar, 1996, S. 3-7*). In der Literatur findet sich, aufgrund der aus wissenschaftlicher Sicht verschiedenen einnehmbaren Perspektiven, keine allgemeingültige Definition des Wissensbegriffs (*Hasler Roumois, 2013, S. 39-40*). In Anlehnung an einen technologischen Kontext aus dem Bereich der Elektronikfertigung basiert Wissen nach (*North, 2011, S. 37*) auf Informationskombinationen, wobei deren Vernetzungen untereinander entscheidend für einen einheitlichen Wissensaufbau sind. Den meisten naturwissenschaftlich geprägten Wissensdefinitionen ist somit die Herangehensweise an einen stufenweisen Aufbau von Wissen in Form einer Wissenspyramide oder Wissenstreppe nach (*Eppich et al., 2002, S. 44; Bodendorf, 2006, S. 1; North, 2011, S. 36-37*)

gemein, weshalb sich die vorliegende Arbeit an diesem Ansatz orientiert und den Prozess des Aufbaus von Wissen in *Abbildung 2.1-2* als Flussdiagramm darstellt und nachfolgend erläutert.

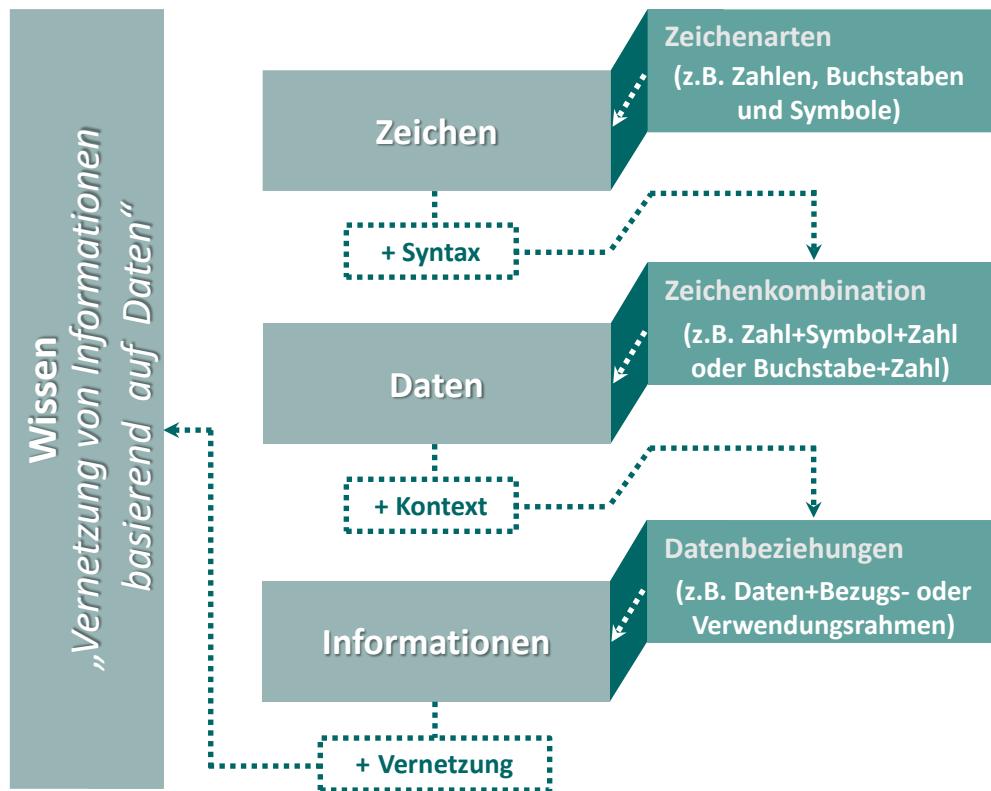


Abbildung 2.1-2. Hierarchischer Zusammenhang zwischen Zeichen, Daten, Informationen und Wissen in eigener Darstellung basierend auf (Rehäuser & Krcmar, 1996, S. 3-7; North, 2011, S. 37; Hasler Roumois, 2013, S. 43-44).

Den ersten Schritt des Flussdiagramms bildet der Bereich Zeichen. Jener Bereich liegt in Form von Buchstaben, Zahlen oder Symbolen vor und dient als Werkzeug der Wissensdokumentation. Durch eine semantische Verknüpfung von mehreren Zeichen entsteht eine Syntax, die verwendet wird, um Ausdrücke zu generieren, deren Abfolge die inhaltliche Beschreibung von formulierten Gedanken ermöglicht und die Definitionsgrundlage von Daten als zweiten Bereich des Flussdiagramms erfüllt. In (*DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 46*) werden Daten als „*Fakten über ein Objekt*“ definiert. Dieser Definition folgt diese Arbeit. Der dritte Bereich des Flussdiagramms umfasst Informationen, die in (*DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 46*) als „*Daten mit Bedeutung*“ definiert werden. Eine ähnliche Einordnung von Informationen finden auch (*Hasler Roumois, 2013, S. 43-44; Rehäuser & Krcmar, 1996, S. 5*), die die Grundlage von Informationen in Datenformen sehen, die in einem definierten Kontext in Beziehung zueinander stehen und einen informationellen Mehrwert für den Verwender darstellen. Einzelne Datenbestände werden

somit in einem semantischen Kontext miteinander verknüpft, liefern dem Leser Erkenntnisse über einen Sachverhalt und bilden als Informationen eine, den Daten überzuordnende, neue Ebene. Der letzte Schritt des Flussdiagramms beschreibt, wie Informationen zu Wissen angereichert werden können. Durch die Vernetzung mehrerer Informationen entsteht nach (North, 2011, S. 37) Wissen. Durch diese stufenweise Interpretation der Wissensentstehung ist die Qualität des Wissens stark abhängig von den Inhalten der vorgelagerten Bereiche Zeichen, Daten und Informationen. Nachfolgend wird eine für diese Arbeit geltende *Definition D2.1-5*, hinsichtlich des Wissensbegriffes, vorgeschlagen.

Definition D2.1-5:

Wissen ist die Verknüpfung von zur Verfügung stehenden oder erhebbaren Informationen, die aus Daten in einem kontextspezifischen Zusammenhang resultieren und durch Zeichen ausgedrückt werden können (vgl. Rehäuser & Krcmar, 1996, S. 3-7; North, 2011, S. 37; Hasler Roumois, 2013, S. 43-44).

Die vorhergehenden Unterkapitel haben beschrieben, dass die Wahl von geeigneten Ressourcen zur Bearbeitung von Methoden einer Methodik zugrunde liegt. Die Wahl der verwendeten Methoden und Ressourcen basiert auf Wissen. Diese Bereiche gilt es zu organisieren, um eine Durchführung eines geordneten Ablaufs von Tätigkeiten durch die Mitarbeiter sicherzustellen. Die Faktoren **Organisation** und **Menschen** werden in die Betrachtung einbezogen und nachfolgend erläutert sowie in *Definition D2.1-6* konkretisiert.

Der Begriff **Organisation** beschreibt in einer von der Wissenschaft losgelösten frei formulierten Definition die geordnete Ausrichtung oder zumindest eine strukturierte Vorbereitung auf eine zukünftig geplante Tätigkeit. Die Beschaffung von Mitteln, Wissen und Ressourcen, die zum Zwecke der Durchführung der geplanten Tätigkeit dienen, ist Teil der Organisation. In der produzierenden Industrie wird die Organisation als wertschöpfender Begriff eingeordnet, wobei in (Frese et al., 2019, S. 22-23) Ansätze mit „*instrumenteller Sichtweise*“ betrachtet werden, um beispielsweise „*die Aktivitäten der Angestellten*“, koordiniert zur Erreichung der übergeordneten Unternehmensziele, auszurichten (Lindemann & Reichwald, 1998, S. 63). Dadurch ist der Bereich **Menschen** in den Bereich der Organisation eingebettet, jedoch auf gleichwertiger Ebene angeordnet, da die Menschen Einfluss auf die Aktivitäten der Organisation nehmen (Burr, 2008,

S. 22). Einerseits können Menschen in einer schöpfenden Art und Weise zur Organisation beitragen, beispielsweise durch die inhaltliche Erarbeitung von strukturellen Beschreibungen zur Organisationsgestaltung. Anderseits können sie der Organisation auch als nicht schöpfendes Individuum gegenüberstehen. Das ist dann der Fall, wenn sie innerhalb einer bestehenden Organisation in ihren Handlungen angeleitet werden (*Schreyögg & Geiger, 2015, S. 77-78*).

Definition D2.1-6:

Der Bereich **Organisation und Menschen** umfasst eine, durch Individuen zu erarbeitende geordnete, Ausrichtung und strukturierte Vorbereitung auf eine zukünftig geplante Tätigkeit.

Nach (*Bach et al., 2017, S. 28*) ist der Mensch als Mitarbeiter somit als ein Aufgabenträger einzuordnen und stellt ein Kernelement der Organisation dar. Weitere Kernelemente sind die durch den Mitarbeiter auszuführenden Aufgaben, die zur Bearbeitung der Aufgaben benötigten Informationen, Hilfsmittel und Instrumente, die in (*Bach et al., 2017, S. 28*) zu einem in Wechselwirkung stehenden System zusammengefasst und in *Abbildung 2.1-3* dargestellt sind. Dieser Ansatz soll auch für diese Arbeit die Grundlage zur Einordnung des Organisationsbegriffes bilden und darauf aufbauend die Beziehung zu den anderen Bereichen aus *Abbildung 2.1-1* beschreiben. Das Kernelement Informationen wird, entgegen der Einordnung von (*Bach et al., 2017, S. 28*), durch den Begriff Wissen und dem damit verbundenen Verständnis als umfassenderer Begriff in dieser Arbeit ersetzt.

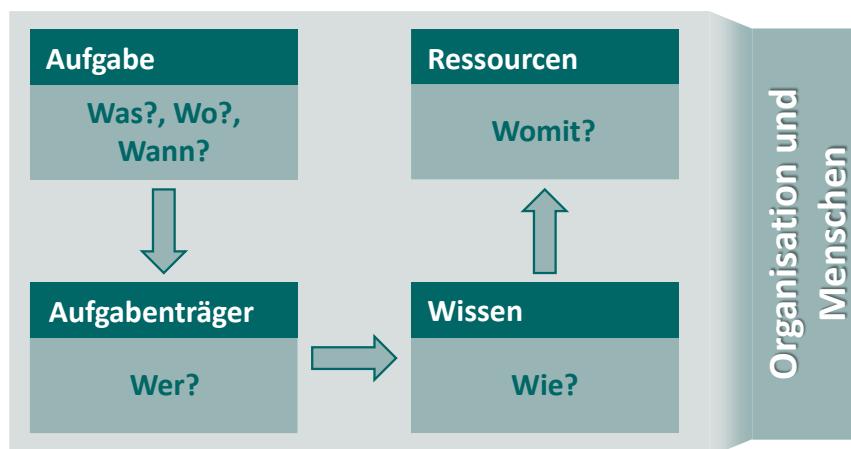


Abbildung 2.1-3. Kernelemente des Bereiches Organisation und Menschen in Anlehnung an
(Burr, 2008, S. 22; Bach et al., 2017, S. 28).

2.1.2 Prozesse, Konzepte, Verfahren und Vorgehensmodelle

Der Begriff **Prozess** umfasst nach (*DIN-IEC 60050-351:2014-09, 2014*) die „*Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen*“, wobei nach (*DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 23*) „*miteinander zusammenhängende Tätigkeiten*“ innerhalb eines Systems zur Umwandlung von Eingangsgrößen zu, teilweise als Ergebnis interpretierbare, Ausgangsgrößen in Form von zeitlichen Wert- und Informationsänderungen führen.

In der Softwareentwicklung wird der Begriff Prozess als eine in Schritten gegliederte Vorgehensweise zur Erfüllung eines spezifizierten Zweckes definiert (*IEEE S.C.C., 1990, S. 57*). Diese Arbeit schlägt eine Kombination der Definitionen nach (*DIN-IEC 60050-351:2014-09, 2014*) und (*DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 23*) entsprechend *Definition D2.1-7* vor und folgt der Einordnung nach (*Burr, 2008, S. 20*), indem der Begriff Prozess den Begriffen Methode, Organisation, Systeme, Informationen und Daten überzuordnen ist (*Burr et al, 2007, S. 4*).

Definition D2.1-7:

Ein **Prozess** ist die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen zur Umwandlung von Eingangsgrößen in, als Ergebnis interpretierbare, Ausgangsgrößen innerhalb eines betrachteten Systems (vgl. *DIN-IEC 60050-351:2014-09, 2014; DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 23; Burr, 2008, S. 20*).

Ein **Konzept** besteht nach (*Duden Online Konzept, o. J.*) aus einem skizzen- oder stichwortartigen Entwurf oder, viel konkreter, einen klar umrissenen Plan für ein beabsichtigtes Vorhaben, das einer Idee oder abstrahierten Vorstellung entspringt. Innerhalb der Ausarbeitung eines Konzeptes, d.h. in der Konzeptphase, werden Tätigkeiten wie Bedarfsermittlungen oder Machbarkeitsanalysen durchgeführt und dokumentiert (*IEEE S.C.C., 1990, S. 19*). Das ausgearbeitete Konzept in seiner endgültigen zur theoretischen oder praktischen Anwendung freigegebenen Fassung, Form oder Version wird als Konzeption verstanden und kann nach (*Chroust, 1992, S. 50*) der Methode untergeordnet werden (*Schumann & Gerisch, 1984, S. 59*). Diesen Ausführungen folgend wird die *Definition D2.1-8* in dieser Arbeit zur Beschreibung eines Konzeptes festgelegt.

Definition D2.1-8:

Ein **Konzept** dient zur Ausgestaltung eines in der Vorstellung klar umrissenen jedoch in der Ausarbeitung formlosen Plans für ein in der Zukunft liegendes beabsichtigtes Vorhaben.

Ein **Verfahren** wird nach (*DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 35*) als eine „*festgelegte Art und Weise, eine Tätigkeit oder einen Prozess auszuführen*“, definiert. Das Verfahren kann dem Begriff Methode als konkrete inhaltliche Ausarbeitung untergeordnet werden (*Chroust, 1992, S. 51; Fornlauf, 2015, S. 7*). Ein Verfahren ist während seiner Durchführung stark einsatzbezogen und konkretisiert die Anwendung von Methoden auf einen Anwendungsfall (*Chroust, 1992, S. 51*). Dadurch lässt sich ein Verfahren eindeutig gegenüber einer Methode abgrenzen, der anwendungsübergreifende Handlungsvorschriften zugrunde liegen. Die für diese Arbeit geltende *Definition D2.1-9* folgt den Ausführungen von (*Chroust, 1992, S. 51; Fornlauf, 2015, S. 7*).

Definition D2.1-9:

Ein **Verfahren** beschreibt eine stark einsatzbezogene Prozedur, die die Verwendung von Methoden auf einen Anwendungsfall konkretisiert (vgl. *Chroust, 1992, S. 51; Fornlauf, 2015, S. 7*).

Das **Vorgehensmodell** organisiert die zeitliche Entwicklung eines geplanten Vorhabens als Problemlösungsstrategie, ausgehend von schematischen Darstellungen oder der Formulierung präzisierter Anforderungen innerhalb der Planungsphase zu eindeutigen Projektergebnissen in der Realisierungsphase (*VDI 2221, 1993, S. 3; VDI/ VDE 2182-1, 2011, S.14; Lacour, 2011, S. 17*). Ein Vorgehensmodell ist nach (*Scholz-Reiter et al., 2011, S. 57*) in Schritten und Phasen untergliedert und nach (*Graupner, 2010, S. 45*) dem Begriff der Methode überzuordnen. Diese Ansicht teilt (*Jablonski et al., 1997, S. 490*) und detailliert den Begriff des Vorgehensmodells als ein Rahmenwerk in dem entschieden wird,

„*in welchen Entwicklungsschritten was, womit, nach welchen Methoden, wann, unter welchen Bedingungen, von welchen Anforderungen ausgehend zu welchen Ergebnissen führend, von wem ausgeführt wird*“ (*Goeken, 2006, S. 54*).

Da diese Definition jedoch im Kontext der Methodologie zu uneindeutig abgrenzbar ist, wird ein Vorgehensmodell in dieser Arbeit als ein Mittel verstanden, Methoden miteinander zu kombinieren, wobei der Mehrwert in der methodenübergreifenden Darstellung von Teilergebnissen und Übergangsanforderungen zwischen einzelnen Methoden liegt. Diese Einordnung wird als *Definition D2.1-10* formuliert und in dieser Arbeit verwendet.

Definition D2.1-10:

Ein **Vorgehensmodell** dient als Rahmenwerk dazu in einzelnen Tätigkeitsphasen Methoden zur Tätigkeitsausführung zu organisieren und Methodenkombinationen innerhalb eines Gesamttätigkeitsvorhabens zu ermöglichen.

2.1.3 Modell, System und Simulation

Der Begriff **Modell** beschreibt nach (*DIN-IEC 60050-351:2014-09, 2014*) eine „*Abbildung eines Prozesses*“ oder nach (*VDI 3633-1, 2014, S. 3*) eine „*vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Originalsystems*“, das vollständig oder teilweise innerhalb einer spezifizierten Abweichung vordefinierte Produktanforderung zur funktionalen Imitation des Originalsystems hinreichend genau erfüllt (*von Pieverling, 2003, S. 9-10*). Modelle werden „*während der Produktentwicklung*“ dazu verwendet, „*eine körperliche dreidimensionale Abbildung des späteren Produktes zur Vorhersage und Überprüfung von Produkteigenschaften zu erstellen*“ (*von Pieverling, 2003, S. 9; Lindemann & Reichwald, 1998, S. 126-128*). Für diese Arbeit wird nachfolgend eine dimensionslose *Definition D2.1-11* des Modellbegriffs gewählt.

Definition D2.1-11:

Ein **Modell** ist eine vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systemzustandes und dient der Vorhersage und Überprüfung von Systemeigenschaften (*vgl. DIN-IEC 60050-351:2014-09, 2014; VDI 3633-1, 2014, S. 3*).

Ein **System** ist nach (*DIN-IEC 60050-351:2014-09, 2014*) als „*eine Menge miteinander in Beziehung stehender Elemente*“ zu definieren, die in einem konkreten Informationswechsel

zueinander und als Gesamtheit eindeutig abgrenzbar von anderen Umgebungselementen zu beschreiben sind. Das Verhalten des Systems ist die Reaktion auf Einflüsse. Das erwartungsgemäße Verhalten des Systems wird als Funktion bezeichnet (Brökelmann, 2015, S. 11). Die Definition eines Systems nach (DIN-IEC 60050-351:2014-09, 2014) wird auch in dieser Arbeit verwendet und nachfolgend als *Definition D2.1-12* formuliert.

Definition D2.1-12:

Ein **System** ist ein Zusammenschluss von miteinander in Beziehung stehenden Elementen, die als Gesamtheit eindeutig von anderen Umgebungselementen zu denen sie keine Interaktion unterhalten abgrenzbar sind (vgl. DIN-IEC 60050-351:2014-09, 2014).

Der **Simulationsbegriff** ist in (VDI 4499-1, 2008, S. 50) als „*Verfahren zur Nachbildung*“ von Systemen definiert und bezieht dessen „*dynamische Prozesse in einem experimentierbaren Modell*“ mit ein (VDI 3633-1, 2014, S. 3). Das Ziel ist die Erlangung von „*Erkenntnissen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind*“ (VDI 4499-1, 2008, S. 50). In dieser Arbeit wird die Simulation als ein Entwicklungswerkzeug verstanden, das virtuelle Modelle verwendet, um existierende oder geplante Produktionsprozesse in einem experimentierbaren Umfeld aufzubauen und zukünftige Arbeitszustände von Produktionen simulationsbasiert evaluieren zu können. In *Definition D2.1-13* wird eine Formulierung des Simulationsbegriffes für Anwendungen, die über die Produktionstechnik hinausreichen, gewählt.

Definition D2.1-13:

Eine **Simulation** ist ein Verfahren zur Nachbildung von Arbeitszuständen in einem experimentierbaren Entwicklungsumfeld und dient der Evaluierung von dynamischen Systemverhaltensweisen (vgl. VDI 4499-1, 2008, S. 50; VDI 3633-1, 2014, S. 3).

2.1.4 Mechatronik und mechatronische Systeme

Das Verständnis der **Mechatronik** entwickelte sich, ausgehend von der Definition der Yaskawa Electric Company von 1969, die „*darunter die elektronische Funktionserweiterung mechanischer*

Komponenten verstand“, durch die spätere Einführung von Mikroprozessoren als Bestandteil der Informationstechnik kontinuierlich weiter (*VDI 2206, 2004, S. 9-10; Harashima et al., 1996, S. 1-2*). In (*Czichos, 2019, S. VII*) wird die Entstehungsgeschichte der Mechatronik, die ihren Ursprung ausgehend von „*historisch getrennt entstandenen physikalischen und technologischen Elementen*“ fand und anschließend zu einem interdisziplinären Ansatz der Ingenieurwissenschaften reifte, ausführlich beschrieben. In (*VDI 2206, 2004, S. 9-14*) werden weitere Definitionen vorgestellt, die die Mechatronik in ihrem Kern als einen interdisziplinäreren Zusammenschluss verstehen, der als eine Ingenieurwissenschaft auf die Inhalte des Maschinenbaus, der Elektro- und Informationstechnik aufbaut. Eine einheitliche Definition hat sich, aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung von technischen Einrichtungen nicht etabliert (*VDI 2206, 2004, S. 10*). Deshalb folgt diese Arbeit dem Kern der Definitionen in (*VDI 2206, 2004, S. 9-14*) und formuliert für diese Arbeit die geltende *Definition D2.1-14*.

Definition D2.1-14:

Die **Mechatronik** ist ein interdisziplinäres Fachgebiet der Ingenieurwissenschaften und befasst sich mit den Konsequenzen des Zusammenwirkens der Bereiche Maschinenbau, Elektrotechnik und Informationstechnik (*vgl. VDI 2206, 2004, S. 9-14*).

Darauf aufbauend sind **mechatronische Systeme** in dieser Arbeit als Elemente zu verstehen, die als Zusammenschluss in einem gemeinsamen funktionalen Kontext arbeiten, in einem logischen Regelkreis miteinander in Beziehung stehen und eindeutig von anderen mechatronischen Systemen durch ihre Funktionsstruktur abgrenzbar sind. Anhand eines anwendungsorientierten Beispiels würde das bedeuten, dass Sensoren physikalische Größen aus der Umwelt aufnehmen und in eine elektrische Größe transformieren können. Diese elektrische Eingangsgröße kann eine Auswerteeinheit, beispielsweise ein Prozessor basierend auf der Informationstechnik, in eine neue Ausgangsgröße transformieren. Die Ausgangsgröße kann dabei wieder als eine elektrische Größe vorliegen, um beispielsweise die Lage von mechanischen Komponenten, auch Aktoren, zu verändern und damit auf die physikalische Umgebung einwirken zu können. Das Endresultat ist eine durch die Sensoren messbare Veränderung der physikalischen Umgebung. Folgende *Definition D2.1-15* fasst das Verständnis dieser Arbeit für mechatronische Systeme zusammen.

Definition D2.1-15:

Mechatronische Systeme sind Zusammenschlüsse von technischen Elementen, die in einem gemeinsamen funktionalen Systemkontext miteinander interagieren und auf den Disziplinen des Maschinenbaus, der Elektrotechnik und Informationstechnik aufbauen.

2.1.5 Eingebettete Systeme

Kennzeichnend für eingebettete Systeme ist die Einbindung, also Integration, in ein übergeordnetes Gesamtsystem (*Marwedel & Wehmeyer, 2008, S. 1*). Darüber hinaus arbeiten eingebettete Systeme zyklisch im Sinne einer Endlosschleife, vorausgesetzt sie werden mit der zur Verrichtung der Aufgabe benötigten elektrischen Energie versorgt (*Berns et al., 2010, S. 2*). Sie sind dadurch in einen sehr eingeschränkten hart definierten Aufgabenkontext eingebettet und auf die Durchführung einer sich in einem definierten Abstand wiederholenden Aufgabe ausgerichtet. Eine eigenständige Anpassung der Aufgabe durch die eingebetteten Systeme findet nicht statt. Ist es gewünscht, dass das eingebettete System eine veränderte Aufgabenprozedur erfährt, so ist eine logische Anpassung der informationsverarbeitenden Einheit eine Voraussetzung zur erfolgreichen Änderung der Aufgabenprozedur. Die logische Anpassung kann über eine Schnittstelle erfolgen, in dem durch Informationstechnik, beispielsweise Programmieren, der Ablauf in der informationsverarbeitenden Einheit verändert wird.

Die Abgrenzung zu mechatronischen Systemen ist nicht eindeutig. Jedoch lassen sich mechatronische Systeme stets auf die drei grundlegenden Disziplinen der Mechanik, Elektrotechnik und Informationstechnik zurückführen. Eingebettete Systeme können ebenfalls zusammenhängende Elemente aus diesen drei Disziplinen umfassen, jedoch auch zusammenhängende Elemente als System beschreiben, die nicht zwingend alle Disziplinen betrachten (*Berns et al., 2010, S. 2*). Ein Beispiel dafür ist eine Einstekkkarte in einem Computer, die durch Prozessoren in einen informationstechnischen Kontext ein eingebettetes System darstellt, jedoch keinerlei mechanische Aufgaben in einem definierten Abstand wiederholt durchführt. Aufbauend auf den Erkenntnissen, wird in der *Definition D2.1-16* das Verständnis von eingebetteten Systemen innerhalb dieser Arbeit formuliert.

Definition D2.1-16:

Eingebettete Systeme sind elektronische Rechenbausteine, die in einen festen Aufgabenkontext innerhalb eines übergeordneten Systems eingebunden sind und in einem definierten Abstand wiederholende Analyse-, Steuerungs- oder Regelungsaufgaben übernehmen.

2.1.6 Cyber-physische Systeme

Der Term cyber-physische Systeme wurde durch Helen Gill, einer Direktorin für das Programm "*Eingebettete und hybride Systeme*" der amerikanischen National Science Foundation (NSF), innerhalb eines Workshops erstmalig der breiten Öffentlichkeit präsentiert (*Cyber-Physical Systems Virtual Organization, o. D.; Lee & Seshia, 2011, S. 3*). Eine frühe sowie weit verbreitete Definition geht auf (*Lee, 2006, S. 1*) zurück, der in seinem Workshop-Beitrag cyber-physische Systeme folgendermaßen interpretiert:

„Cyber-physical Systems (CPS) are integrations of computation with physical processes. Embedded computers and networks monitor and control the physical processes, usually with feedback loops where physical processes affect computations and vice versa“ (Lee, 2006, S. 1).

Dieser Definitionsansatz von cyber-physischen Systemen lässt jedoch aufgrund der sehr verallgemeinerten Formulierung der Definition einen großen Interpretationsspielraum zu. Nach (*Kowalewski et al., 2012, S. 114*) würden sich durch diese Definition „alle digitalen Regler, Steuerungen und Prozessleitsysteme der letzten knapp 50 Jahre“ als cyber-physische Systeme bezeichnen lassen. In einem weiteren Beitrag des in 2006 durchgeführten Workshops, beschreiben Mitarbeiter des Massachusetts Institute of Technology (MIT), cyber-physische Systeme aus Sicht der benötigten Systemanforderungen entsprechend mit:

“Cyber-Physical Systems (CPS) require the integration of a heterogeneous physical layer and a virtual global decision and control network, mediated by decentralized and distributed local sensing/actuation structures” (Megretski et al., 2006).

Der Handlungsspielraum von cyber-physischen Systemen wird in dieser Definition umfassender eingeordnet, indem das Anwendungsspektrum von eingebetteten Systemen auf eine globale Ausweitung durch die Verwendung von Netzwerken und eine dezentrale Verteilung von einzelnen Systembestandteilen verdeutlicht wird. Diesem Ansatz folgt (VDI/VDE-GMA, 2013, S. 2) und orientiert sich bei der Definitionsfindung an den Ausführungen der „Integrierten Forschungsagenda Cyber-Physical Systems“, indem sich cyber-physische Systeme vor allem „durch eine Verknüpfung von realen (physischen) Objekten und Prozessen mit informationsverarbeitenden (virtuellen) Objekten und Prozessen“ auszeichnen und dazu „teilweise globale und jederzeit miteinander verbundene Informationsnetze“ verwenden (Broy, 2010, S. 17-21; Geisberger et al., 2011, S. 10-17; Geisberger & Broy, 2012, S. 22).

Das 2010, durch die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, gegründete und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderte Projekt besteht aus Mitgliedern der Industrie mit einem stark informationstechnologisch geprägten Hintergrund. Der Fokus liegt, aufbauend auf den identifizierten wissenschaftlichen und technologischen Herausforderungen, vor allem darin, „*abstrakte Modelle der Informatik*“ mit anderen Modellen zu verknüpfen oder „*Konzepte des Systems Engineering*“ konsequent zu erweitern (Geisberger et al., 2011, S. 24).

In der, aus der Sicht der Automatisierungstechnik, folgenden Stellungnahme des Vereines Deutscher Ingenieure (VDI) von 2013 wird erklärt, dass eine „*Kopplung von informationsverarbeitenden Komponenten mit physischen Objekten und Prozessen*“ bereits „*seit den 1970er-Jahren*“ existiere und der wesentliche Unterschied der Definition gegenüber automatisierten Systemen in der globalen Kommunikationsmöglichkeit besteht (VDI/VDE-GMA, 2013, S. 2). Darauf aufbauend werden cyber-physische Systeme im weiteren Verlauf der Stellungnahme dadurch charakterisiert, dass sie „*System-, Organisations- und Domänengrenzen überschreiten*“, wobei einzelne Komponenten „*relevante Daten und Dienste zur Verfügung*“ stellen, nutzen und sich in ihrer „*Struktur während der Betriebszeit dynamisch*“ ändern können (VDI/VDE-GMA, 2013, S. 3).

Es ist zu erkennen, dass sich die Definitionslandschaft von cyber-physischen Systemen seit der Begriffsinitiierung durch Helen Gill in 2006 zwar stetig weiterentwickelt, jedoch eine allgemein akzeptierte Definition bisher nicht existiert. Eine verallgemeinerte Definition von cyber-physischen Systemen, die eine disziplinübergreifende Verwendung zulässt, birgt zumeist das

Risiko einer so allseitigen Formulierung, dass Systeme ohne cyber-physische Merkmale absichtslos in diese Definition eingeordnet werden können. Hinzu kommt, dass cyber-physische Systeme ihren Einsatz in multidimensionalen Anwendungen finden. In (*Törngren et al., 2017, S. 4*) heißt es zu dieser Ansicht, dass uneindeutig zu identifizieren sei, zu welchem Zeitpunkt cyber-physische Systeme als cyber-physisch feststellbar sind, wenn sie sowohl als „*kleinste Schrittmacher*“ als auch in Form eines „*nationalen Stromnetzes*“ in Erscheinung treten können.

Aus diesen Gründen scheint ein disziplinbezogener Ansatz, der die Definition cyber-physischer Systeme aus der Perspektive der jeweiligen Anwendungsbereiche formuliert, für eine eindeutige systematische Abgrenzung sinnvoller zu sein. Aufbauend auf den Beschreibungen von cyber-physischen Systemen in einem informationstechnologischen Kontext nach (*Geisberger et al., 2011, S. 10-17*) oder aus der Sicht der Automatisierungstechnik in (*VDI/VDE-GMA, 2013, S. 2-3*) wird diese Arbeit den Term cyber-physische Systeme aus Sicht der Produktion betrachten. Hierzu hat sich in der Literatur die Verwendung des Begriffs cyber-physische Produktionssysteme etabliert und findet auch in dieser Arbeit Verwendung.

2.1.7 Produktion und Produktionssysteme

Ein wesentlicher Bestandteil dieser Arbeit wird die Betrachtung von cyber-physischen Produktionssystemen sein. Daher werden die Begriffe Produktion und Produktionssysteme für diese Arbeit definiert.

In der wissenschaftlichen Literatur hat sich im Verlauf der letzten Jahrzehnte ein grundsätzlicher Definitionsansatz des Produktionsbegriffes etabliert, der auch in dieser Arbeit zur Formulierung der *Definition D2.1-17* einer Produktion verwendet wird. Demnach ist eine **Produktion** ein Transformationsprozess von Produktionsfaktoren wie Güter mit kombinierten Dienstleistungen (Input), die eine wertschöpfende Umwandlung (throughput) in andere oder veränderte Güter oder Dienstleistungen (Output) erfahren (*Fandel, 1987, S. 1; Werner, 1996, S. 16; Dangelmaier, 2009, S. 3; Bloech et al., 2014, S. 3; Kellner et al., 2020, S. 3-4*). In den wertschöpfenden Umwandlungsprozess eingehende Güter werden u.a. durch Rohstoffe, Betriebsmittel und Dienstleistungen in Form von Wartungen an technischen Einrichtungen repräsentiert (Kellner et al., 2020, S. 126-127). Im Vordergrund der ausgehenden Güter und Dienstleistungen stehen der Vertrieb oder die Distribution der erzeugten Produkte.

Definition D2.1-17:

Die **Produktion** ist ein transformierender Prozess von in die Produktion eingehen Gütern und Dienstleistungen, die innerhalb der Produktion eine wertschöpfende Umwandlung in ausgehende Güter und Dienstleistungen erfahren (vgl. Fandel, 1987, S. 1; Werner, 1996, S. 16; Dangelmaier, 2009, S. 3; Bloech et al., 2014, S. 3; Kellner et al., 2020, S. 3-4; Kellner et al., 2020, S. 126-127).

Die wertschöpfende Umwandlung (throughput) wird durch den Einsatz von Produktionssystemen erzielt. Unter einem **Produktionssystem** werden in dieser Arbeit Betriebsmittel, Anlagen und technische Ressourcen verstanden, die die Herstellung der zu produzierenden Produkte durch vordefinierte Prozesse ausführen.

Innerhalb der Produktion stellen Produktionssysteme somit durch ihre betriebliche Leistungserbringung, die in der Produktrealisierung endet, den Kernaspekt der Wertschöpfung für produzierende Unternehmen dar. Eine etablierte Definition der Systemgrenzen von Produktionssystemen ist auch aufgrund der vielfältigen Betrachtungsmöglichkeiten vor allem aus verschiedenen technischen und betriebswirtschaftlichen Perspektiven in der Literatur nicht eindeutig zu identifizieren. In Anlehnung an (Decker, 2009, S. 8-9; VDI 5200-1, 2011) können Produktionssysteme somit Größenordnungen „*von einer einzelnen Maschine mit Bediener bis zum kompletten Produktionsbetrieb*“ annehmen. Eine projektübergreifend geltende Festlegung der Produktionssystemgrenzen scheint daher für diese Arbeit nicht sinnvoll. Vielmehr soll die für diese Arbeit geltende *Definition D2.1-18* von Produktionssystemen als eine Orientierung mit variierenden technischen und strukturellen Betrachtungsgrenzen verstanden werden.

Definition D2.1-18:

Ein **Produktionssystem** ist ein Zusammenschluss von technischen, natürlichen und virtuellen Ressourcen, die durch vordefinierte Prozesse eine wertschöpfende Leistungserbringung innerhalb von Unternehmen realisieren.

2.1.8 Cyber-physische Produktionssysteme

Für den Einsatz von cyber-physischen Systemen auf industrieller Produktionsebene wird in dieser Arbeit der Term „cyber-physische Produktionssysteme“ formuliert, der sich in wissenschaftlichen Arbeiten etabliert hat und im weiteren Verlauf der Arbeit verwendet wird.

Wie in der Vergangenheit werden, produzierende Unternehmen auch in Zukunft im Spannungsfeld der industriellen Produktion mit verschiedenen Herausforderungen konfrontiert. Immer kürzere Produktlebenszyklen, eine steigende Produktvarianz bis Losgröße 1 und die Reduzierung der Lagerkapazitäten führen zur Notwendigkeit, bestehende Produktionssysteme kontinuierlich weiterzuentwickeln, um den Bedarf an zukünftigen Produkten, seitens der Konsumenten erfüllen zu können (*Andelfinger & Hänsch, 2017, S. 30, 51; Westkämper & Löffler, 2016, S. 51-53*).

Die industrielle Einführung von cyber-physischen Produktionssystemen ist, aus Sicht der Forschung, eine Möglichkeit, den produktionsseitigen Herausforderungen zu begegnen. Cyber-physische Produktionssysteme gelten dabei nach (*VDI/VDE-GMA, 2013, S. 3*) als „*adaptive, sich selbst konfigurierende und teilweise selbstorganisierende flexible Produktionsanlagen*“, wodurch Anwender vor allem in der Lage sind, industrielle Produktionen an turbulente Marktsituationen anpassen zu können (*Lechler & Schlechtendahl, 2016, S. 61; Westkämper, 2003, S. E-2-E-3*).

Aus Sicht der Forschungsunion und der deutschen Akademie der Technikwissenschaften fördern cyber-physische Produktionssysteme in der Anwendung vor allem die durchgängige „*Betrachtung von Produkt, Produktionsmittel und Produktionssystem unter der Berücksichtigung sich ändernder und geänderter Prozesse*“ (*N.N., 2013, S. 84*). Diese Definition erweitert (*Monostori, 2014, S. 9*) und beschreibt, dass die Inhalte von cyber-physischen Produktionssystemen auf den aktuellsten Weiterentwicklungen der Computer-Wissenschaften, Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Fertigungswissenschaften und -technologien basieren. Konkreter und ausführlicher werden (*Ribeiro & Björkman, 2017, S. 3817*) in deren vorgeschlagener Definition die Betrachtungsgrenzen von cyber-physischen Produktionssystemen insofern erweitert werden, als dass cyber-physische Produktionssysteme aus einer „*Zusammensetzung*“ von „*Humanressourcen, Produktionsanlagen und aggregierten Produkten*“ bestehen, „*für die eine oder mehrere cyber-physisch formulierte*

Interaktionsschnittstellen eingerichtet werden“. Die Interaktionsschnittstellen dienen dabei der Überwachung, Steuerung und Generierung von Wissen, das sowohl den Humanressourcen, sowie den aggregierten Produkten und den Produktionssystemen während ihres Lebenszyklusses entspringt (*Ribeiro & Björkman, 2017, S. 3817*). Das eingebrachte Wissen dient dazu, „*den Betrieb kontinuierlich zu verbessern und den strategischen Verbrauch von Kapital, Rohstoffen und Energie in ihren vielfältigen Formen zu ermitteln*“.

Analog der Definitionen von cyber-physischen Systemen enthalten auch die Definitionen von cyber-physischen Produktionssystemen häufig ökonomische Perspektiven und verschiedenste systemische Betrachtungsgrenzen. Ein Grund dafür kann, trotz der Spezifizierung des Anwendungsfeldes, die Breite der Forschungsfelder sein, die sich von den Anwendungen der Produktions- und Fertigungstechnik bis in den Bereich der Intralogistik erstrecken können (*Huber, 2016, S. 39, 43-44; Schuhmacher & Hummel, 2016, S. 19-24*). Ein anderer Grund können aktuelle Umsetzungshemmnisse, seitens der Industrie, in Bezug auf die Einführung von cyber-physischen Produktionssystemen sein. Diese umfassen vor allem den aktuellen Fortschritt der technologischen Realisierung, fehlende Möglichkeiten zur Verifizierung sowie Validierung und damit zur Erhöhung der Akzeptanz sowie Methoden oder Konzepte, die die Entwicklung dieser Systeme, ausgehend vom Entwurf bis zur Realisierung, begleiten (*N.N., 2013, S. 89-91; Monostori, 2014, S. 12; Ribeiro & Björkman, 2017, S. 3818; Marik & McFarlane, 2005, S. 33*).

Das wesentliche Ziel dieser Arbeit ist zu untersuchen in welcher Art und Weise die virtuelle Inbetriebnahme dazu beitragen kann cyber-physische Produktionssysteme in ihrer angestrebten Nutzung funktional und in einem technologischen Kontext zu valideren. Daher fokussiert sich diese Arbeit auf den technologischen Aspekt von cyber-physischen Produktionssystemen und definiert cyber-physische Produktionssysteme, basierend auf den Ausführungen von (*Ribeiro & Björkman, 2017, S. 3817-3820*).

Ein cyber-physisches Produktionssystem gilt in dieser Arbeit als ein Zusammenschluss von technischen, natürlichen und virtuellen Ressourcen, die mittels cyber-physischer Interaktionsschnittstellen Wissen zur Überwachung und Steuerung von Produktionsanlagen austauschen und dabei über eigene Ressourcen- und System- und Modulgrenzen hinaus Informationen zur Ausführung der Produktion liefern und beziehen können.

Die technischen Ressourcen umfassen, entsprechend *Kapitel 2.1.1*, die jeweils eingesetzten Betriebsmittel. Natürliche Ressourcen repräsentieren in erster Linie, die mit den technischen Ressourcen interagierenden Mitarbeiter in der Produktion.

Die virtuellen Ressourcen beschreiben die eingesetzten softwarebasierenden Werkzeuge zur Analyse, Steuerung und Wartung technischer Ressourcen. Die cyber-physischen Interaktionsschnittstellen verknüpfen die virtuellen Ressourcen mit den technischen und natürlichen Ressourcen (*Ribeiro & Björkman, 2017, S. 3817*). Gleichzeitig ist die Ausprägung der Interaktionsschnittstellen entscheidend für die Interaktionsfähigkeit zwischen den Ressourcen und dem daraus resultierenden Mehrwert für den Anwender. Diesen Mehrwert beschreiben viele wissenschaftliche Veröffentlichungen häufig mit einem möglichen produktionsseitigen Anstieg der Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit oder Wandlungsfähigkeit, also Charakteristika einer Produktion, um eine erhöhte Reaktionsfähigkeit der Produktion auf Marktturbulenzen zu gewährleisten (*Monostori, 2014, S. 12; Huber, 2016, S. 43; Schuhmacher & Hummel, 2016, S. 20*). Aufbauend auf den Erkenntnissen wird die für diese Arbeit geltende *Definition D2.1-19* zur Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme formuliert.

Definition D2.1-19:

Ein **cyber-physisches Produktionssystem** ist ein Zusammenschluss von technischen, natürlichen und virtuellen Ressourcen, die mittels cyber-physischer Interaktionsschnittstellen Wissen zur Überwachung und Steuerung von Produktionsanlagen austauschen und dabei über eigene Ressourcen-, System- und Modulgrenzen hinaus Informationen zur Ausführung der Produktion liefern und beziehen können.

2.1.9 Verifikation, Validierung und Absicherung

Der Begriff **Verifikation**, auch Verifizieren, beschreibt nach (*DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 49*) ein Prüfverfahren zur Ermittlung objektiv bewertbarer festgelegter Produkteigenschaften und -anforderungen (*IEEE S.C.C., 1990, S. 81; Markert, 2012, S. 10*). Objektiv bewertbare Produkt- oder Produktionseigenschaften sind in dieser Arbeit quantitativ mess- oder evaluierbare Daten, die als Anforderungen definiert werden und eine eindeutige Beurteilung der Erreichbarkeit

zulassen. Nach objektiv bewerteter Feststellung der Erfüllung der spezifizierten Produkt- oder Produktionseigenschaft gilt die Produkteigenschaft selbst als verifiziert. Verifikationsmethoden können beispielsweise zur Dokumentenanalyse verwendet werden, um, auf Basis von Konsistenzkriterien, mögliche Fehler in umfangreichen Datenstrukturen zu untersuchen (Sinz, 2003, S. 108). In dieser Arbeit beschreibt der Prozess der Verifikation, entsprechend *Definition D2.1-20*, die Entscheidung, ob das Produkt in der Lage ist, seine, in den Anforderungen definierten Eigenschaften unter objektiven Bewertungskriterien ausreichend, d.h. anforderungsgerecht zu erfüllen.

Definition D2.1.-20:

Die **Verifikation** dient der Überprüfung, ob ein Produkt seine in den Anforderungen definierten und quantitativ messbaren Produkteigenschaften erreicht (vgl. DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 49; IEEE S.C.C., 1990, S. 81; Markert, 2012, S. 10).

Die **Validierung** prüft nach (DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 50), ob ein Produkt im beabsichtigten Nutzungskontext die spezifizierten Anforderungen für den beabsichtigten Gebrauch erfüllt (IEEE S.C.C., 1990, S. 80). Dabei ist die klassische Validierung von einer Benutzer Validierung zu unterscheiden. Erstere bezieht sich auf die Erfüllung der Anforderung, dass das Produkt für seinen jeweiligen Gebrauch überhaupt geeignet ist. Letztere bezieht die Fähigkeiten, Erfahrungswerte und den Bildungsstand des Produktanwenders hinzu und prüft die Erfüllung der subjektiven Nutzeranforderung zur Bewertung der Erfüllung der Produktanforderungen. In dieser Arbeit beschreibt der Prozess der Validierung die Entscheidung, ob ein Produkt in der Lage ist, seinen in den Anforderungen definierten beabsichtigten Gebrauch entweder unter Beachtung oder unter Nichtbeachtung der Nutzeranforderungen erreichen kann.

Definition D2.1-21:

Die **Validierung** dient der Überprüfung, ob ein Produkt seine in den Anforderungen definierten Produktbestimmungen innerhalb des beabsichtigten Nutzungskontexts erfüllt (vgl. DIN EN ISO 9000:2015-11, 2015, S. 50; IEEE S.C.C., 1990, S. 80).

Der Begriff **Absicherung** ist in einem technischen Kontext weder normiert noch in der wissenschaftlichen Literatur eineindeutig definiert. Grundlegend wird mit dem Begriff „Absicherung“ eine allgemeine umfassende Sicherstellung, auch Erfüllung, der im Verwendungskontext genannten Anforderungen gemeint sein. Daher ist in dieser Arbeit der Begriff der Absicherung stets im entsprechenden Verwendungskontext zu gebrauchen.

2.1.10 Inbetriebsetzung, Inverkehrbringen, Inbetriebnahme und in Betrieb nehmen

Der Begriff **Inbetriebsetzung** oder das Inbetriebsetzen einer Maschine oder technischen Einrichtung ist rechtlich nicht definiert, wird jedoch häufig synonym zum Begriff Ingangsetzung gebraucht. Der Begriff Ingangsetzung wird ebenfalls rechtlich nicht eineindeutig definiert, jedoch im Gegensatz zur Inbetriebsetzung in der Maschinenrichtlinie als Prozess der „*nur durch absichtliches Betätigen einer hierfür vorgesehenen Befehlseinrichtung möglich sein*“ darf (*Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 37; Kring, o. J.*). Eine Befehlseinrichtung ist eine dem Anwender zur Verfügung stehende Bedienungseinrichtung, die als Mittel zum Ingangsetzen einer technischen Einrichtung dient und nach (*Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 38*) Voraussetzung für das Betreiben und Stillsetzen von Maschinen ist. Aufbauend auf den Ausführungen in (*Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 37-38*) wird das Verständnis des Begriffs Inbetriebsetzung für diese Arbeit in *Definition D2.1-22* festgelegt.

Definition D2.1-22:

Die **Inbetriebsetzung** einer technischen Einrichtung beschreibt einen Prozess, der ausschließlich durch bewusstes Betätigen einer hierfür vorgesehenen Befehlseinrichtung ausgeführt wird (vgl. *Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 37*).

Das **Inverkehrbringen** einer Maschine oder technischen Einrichtung beschreibt nach (*Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 20*) deren „*Erstmalige Bereitstellung in der Gemeinschaft im Hinblick auf ihren Vertrieb oder ihre Benutzung*“. Der Prozess grenzt sich durch den wirtschaftlichen Aspekt der entgeltlichen oder unentgeltlichen Veräußerung einer Maschine oder unvollständigen Maschine von der technischen Inbetriebsetzung ab. Als eine unvollständige Maschine ist eine technische Einrichtung definiert, die nur durch Integration in eine andere

technische Einrichtung oder durch Zusammenbauprozesse mit anderen technischen Einrichtungen ein neues System im Sinne der Vorgaben der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG bildet (*Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 19*).

Definition D2.1-23:

Das **Inverkehrbringen** einer technischen Einrichtung beschreibt deren erstmalige Bereitstellung im Sinne einer Veräußerung oder eines Vertriebs (vgl. *Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 19*).

Die **Inbetriebnahme** bezeichnet nach (*Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 20*) die „erstmalige bestimmungsgemäße Verwendung einer von“ der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG „erfassten Maschinen in der Gemeinschaft“. Unter einer bestimmungsgemäßen Verwendung versteht (*Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 34*) den Gebrauch der Maschine entsprechend der in der Betriebsanleitung definierten Vorgaben. Die DIN 32541 verallgemeinert den Prozess der Inbetriebnahme als „*Bereitstellen einer Maschine oder eines vergleichbaren Arbeitsmittels zur Nutzung*“ (*DIN 32541:1977-05, 1977, S. 1; Jösslin, 2014, S. 2*). Die Grundlage für eine erfolgreiche Inbetriebnahme bildet die Konformitätserklärung mit der Hersteller im Anschluss an seine Konformitätsprüfung erklärt, dass seine Maschine oder technische Einrichtung den Vorgaben der europäischen Maschinenrichtlinie entspricht. Diese Arbeit folgt der Definition der Inbetriebnahme technischer Einrichtung nach (*Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 20*) und formuliert die für diese Arbeit geltende *Definition D2.1-24*.

Definition D2.1-24:

Die **Inbetriebnahme** einer technischen Einrichtung beschreibt deren erstmalige bestimmungsgemäße Verwendung (*Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006, S. 20*).

Die Inbetriebnahme ist von dem Begriff „**in Betrieb nehmen**“ zu unterscheiden. Nach (*DIN EN ISO 12100:2011-03, 2011, S. 3*) beschreibt „in Betrieb nehmen“ einen Prozess zur Überprüfung von (Teil-) Funktionen von Objekten. Während dieses Prozesses müssen die Anforderungen der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG im Falle, dass es sich bei dem betrachteten Objekt um eine

Maschine oder technische Einrichtung handelt, nicht zwingend erfüllt sein. Deshalb ist der Prozess „in Betrieb nehmen“ im Maschinenlebenszyklus vor der Maschineninbetriebnahme anzutreffen. Da der Begriff „in Betrieb nehmen“ die verbalisierte Form der Inbetriebnahme ist, sich laut (*DIN EN ISO 12100:2011-03, 2011, S. 3*) jedoch von der Inbetriebnahme als eigenständiger vorgelagerter Prozess unterscheidet, formuliert diese Arbeit die *Definition D2.1-25*, aufbauend auf den Ausführungen der (*DIN EN ISO 12100:2011-03, 2011, S. 3*).

Definition D2.1-25:

Der Begriff **in Betrieb nehmen** beschreibt einen Prozess zur Überprüfung von technischen Teilfunktionen ohne die Vorgaben der Maschinenrichtlinie zwingend zu erfüllen.

2.2 Produktionsentstehungsprozess

Die **Produktionsentstehung** umfasst in dieser Arbeit alle, der Produktionsausführung vorgelagerte Arbeitsphasen, die für das Erschaffen und den Betrieb aus Sicht der Planung, Entwicklung und Realisierung von zukünftig existierenden Produktionssystemen notwendig sind. In (*Brökelmann, 2015, S. 17*) wird der hier vorgestellte Produktionsentstehungsprozess als Anlagenentstehungsprozess formuliert und in dieser Arbeit synonym verwendet. Ferner wird vermehrt die Formulierung Produktionssystem als Anlagen oder Produktion verwendet, jedoch in dieser Arbeit ebenfalls als Synonyme betrachtet. Innerhalb des Produktionsentstehungsprozesses gibt es keine allgemeingültige *Reihenfolge* (*VDI 4499-1, 2008, S. 17*). In dieser Arbeit wird der Produktionsentstehungsprozess in die drei Hauptphasen Produktionssystemplanung, -entwicklung und -realisierung gegliedert, siehe *Abbildung 2.2-1*. Die konkreten Inhalte der drei Hauptphasen werden nachfolgend zusammengefasst erläutert.

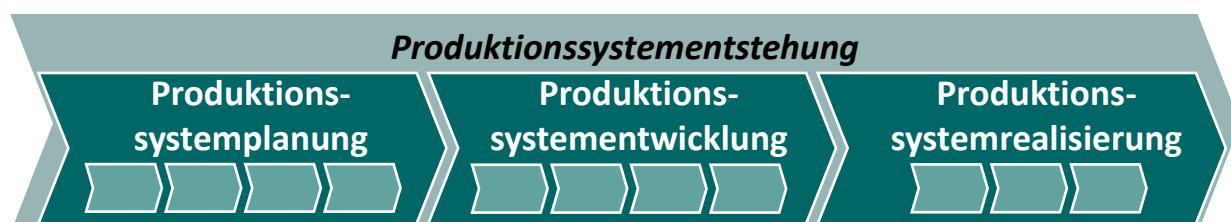


Abbildung 2.2-1. Phasen des Produktionsentstehungsprozesses.

2.2.1 Produktionssystemplanung

Die konkreten Aspekte der Produktionssystemplanung in dieser Arbeit orientieren sich an den Ausführungen in (*Bloech et al., 2014, S. 99, 109-111, 147-149, 211-217*) und werden nachfolgend zusammengefasst. Die Produktionssystemplanung wird in die Konzeption der zu planenden Produktion, die Produktionsprogrammplanung, die Bereitstellungsplanung und die Durchführungsplanung unterteilt, siehe *Abbildung 2.2-2*.

Im Bereich der **Konzeption** wird das Produktionsvorhaben, ausgehend vom vorliegenden Produktstatus, definiert. Im Anschluss findet die Konzeptionierung sowie eine strategische Ausrichtung der Produktion auf Prozess- und Ressourcenebene statt (*Brökelmann, 2015, S. 23; Nordsiek, 2012, S. 99*). Die wesentlichen Aspekte der Konzeptionierung sind die Auswahl und Spezifizierung der Produktionsprozesse mit dem Ziel, einen Plan der Arbeitsvorgänge zu erarbeiten, auf dessen Basis im Anschluss die zur Produktionsausführung benötigten Produktionsressourcen bestimmt werden können (*Brökelmann, 2015, S. 25*).

Die sich im Planungsprozess anschließende **Produktionssystemprogrammplanung** kann, je nach Bedarf, strategisch, taktisch oder operativ erfolgen (*Bloech et al., 2014, S. 106*). Die Entscheidungsgrundlage bilden Faktoren wie die Planung der wirtschaftlichen Ausrichtung der Unternehmen, Eindeutigkeit der Planungsinhalte oder die Laufzeit des Planungsvorhabens. Die wesentliche Zielstellung der Produktionsprogrammplanung ist die Spezifizierung der zu produzierenden Produkte, die Kalkulation der Fertigungs- und Absatzmengen sowie die Terminierung der produzierten Produkte (*Bloech et al., 2014, S. 105-107*).

Die **Bereitstellungsplanung** wird in die beiden Phasen Anlagen- und Materialwirtschaft untergliedert. Die Anlagenwirtschaft verfolgt das Ziel der Sicherstellung der Verfügbarkeit von Betriebsmitteln, Grundstücken und externen Dienstleistern über den in der Programmplanung definierten Zeitraum. Die Materialwirtschaft stellt sicher, dass eine bedarfsgerechte Bereitstellung von Werk-, Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffen sowie Vorprodukte in Form von Baugruppen an den zu versorgenden Anlagen und Betriebsmitteln zum benötigten Zeitpunkt, in ausreichender Menge und genügender Qualität zur Verfügung stehen.

Die **Durchführungsplanung** umfasst Tätigkeiten, die der Strukturierung wie auch Zuordnung der Produktionsbereiche dienen. Konkrete Inhalte der Durchführungsplanung sind die Adressierung

der Maschinisierungsgrade, Ablaufplanungen, Festlegung der Infrastruktur innerhalb der Produktion sowie die Zuweisung des zur Verfügung stehenden Personals an die jeweiligen Arbeitsplätze.

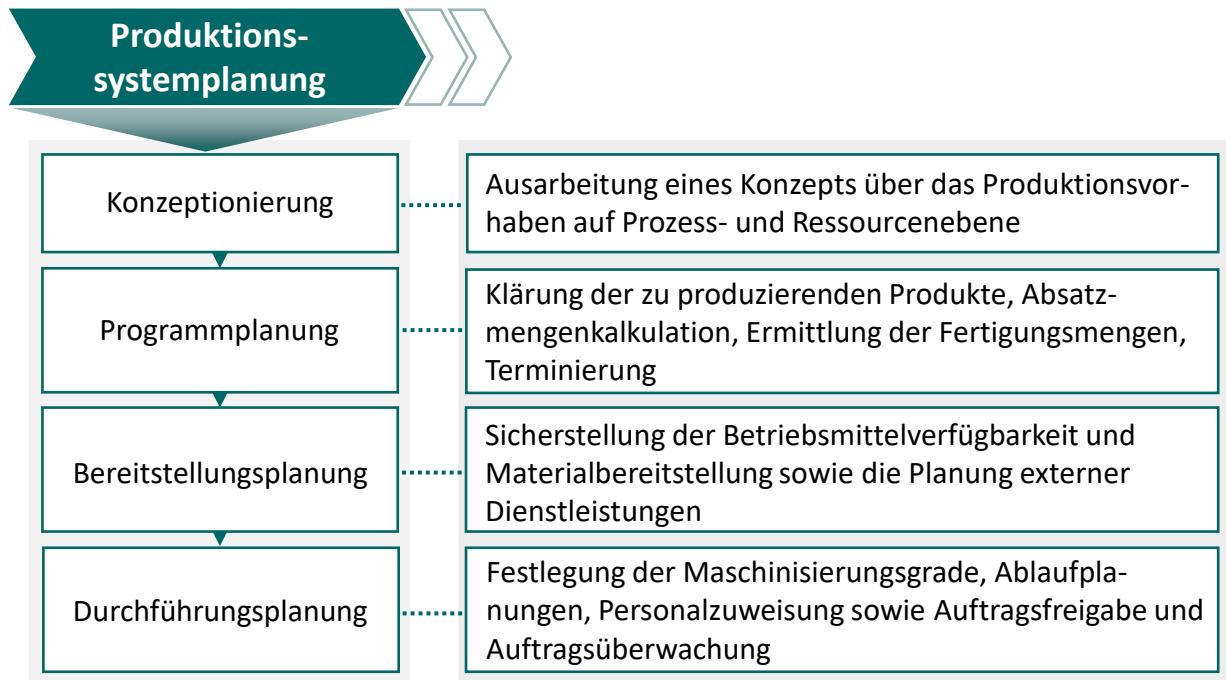


Abbildung 2.2-2. Phasen der Produktionssystemplanung in Anlehnung an (Bloech et al., 2014, S. 105-107, 147-149, 211-213).

2.2.2 Produktionssystementwicklung

Die Produktionssystementwicklung schließt sich der Produktionssystemplanung an und verfolgt die Zielstellung, die Konzepte und Ergebnisse der Planung durch Methoden und Werkzeuge zu entwerfen. Die Phase der Produktionssystementwicklung setzt sich, entsprechend *Abbildung 2.2-3*, aus den Schritten der Datenbeschaffung, der Modellierung mittels CAx sowie die Erarbeitung des Materialflusses und des Feinlayouts zusammen.

Die konkreten inhaltlichen Aufgaben der Entwicklungsphase umfassen zunächst die Beschaffung der zur weiteren Entwicklung benötigten **Daten**. Bei diesen Daten handelt es sich um virtuelle Modellierungsdaten beispielsweise von externen Herstellern, die in die eigene Entwicklungsumgebung zur Vervollständigung der Anlagenmodelle integriert werden müssen. Oft sind Zwischenschritte, wie die Aufbereitung der virtuellen Modelle zur Sicherstellung der

Softwarekompatibilität notwendig bevor sie in der unternehmenseigenen Datenbank abgelegt und in der Entwicklungsumgebung verwendet werden können. Neben virtuellen Modellen der Anlagen und Anlagenkomponenten bilden weitere Daten wie Arbeitspläne, Arbeitsplatzgestaltung, Steuerungsinformationen oder Unterlagen zu prozessualen Abläufen notwendige Voraussetzungen für nachfolgende Entwicklungsphasen (*Albers & Gausemeier, 2012, S. 20*).

Mit einem zeitlichen Versatz, aber dennoch parallel zur Datenbeschaffung, beginnt bereits die virtuelle Entwicklung der Mechanik, Elektrik, Fluidik und Softwareprogrammierung durch die Verwendung von **CAx (Computer-Aided-x)**-Werkzeugen, also rechnerunterstützte Entwicklungssoftwares. Das „x“ stellt einen Platzhalter dar und repräsentiert die Interdisziplinarität der softwareseitigen Anwendungen während der Entwicklung. Innerhalb der Entwicklungssoftwares wird die Mechanik, Elektrik und Fluidik des zukünftig existierenden Produktionssystems geometrisch erarbeitet und die Steuerungssoftware programmiert. Darüber hinaus werden virtuelle Modelle der Anlagen und Anlagenkomponenten von externen Dienstleistern integriert.

Bereits zu diesem Zeitpunkt werden ebenfalls die produktionssysteminternen **Materialflüsse** und Materialflussanbindungen modelliert. Dabei umfasst das Materialflusssystem nach (*Brökelmann, 2015, S. 14*) neben Beförderungseinrichtungen zum Produkttransport auch Hilfsmittel, die beispielsweise Hilfsstoffe oder Abfälle fördern. Darüber hinaus erweitert die (*DIN EN 14943, 2006, S. 73*) diese Formulierung und bezieht, aus Sicht der Logistik, die Reihenfolge der Bereitstellung von zu verarbeitenden Produkten und Stoffen sowie deren Verteilung in der Produktion in den Materialfluss mit ein (*Lacour, 2011, S. 15*).

Die Entwicklungsphase endet mit der Erstellung eines **Feinlayouts** des gesamten, in Zukunft entstehenden Produktionssystems. In den vorgelagerten Planungs- oder Entwicklungsphasen entstehen bereits Layoutvarianten, die während der entstehenden Produktion in ihrer Realisierbarkeit bewertet werden (*Landherr et al., 2013, S. 174*). Das Feinlayout repräsentiert in seinem Detaillierungsgrad die letzte Ebene vor der Produktionsrealisierung und beinhaltet, neben dem Aufstellungsplan von Maschinen, Anlagen und Arbeitsplätzen, vor allem auch die örtlichen Gegebenheiten. Hierunter fallen beispielsweise geometrische Begrenzungen innerhalb

der Produktion oder auch die Lokation notwendiger Versorgungsanschlüsse für den Betrieb der entstehenden Produktionssysteme.

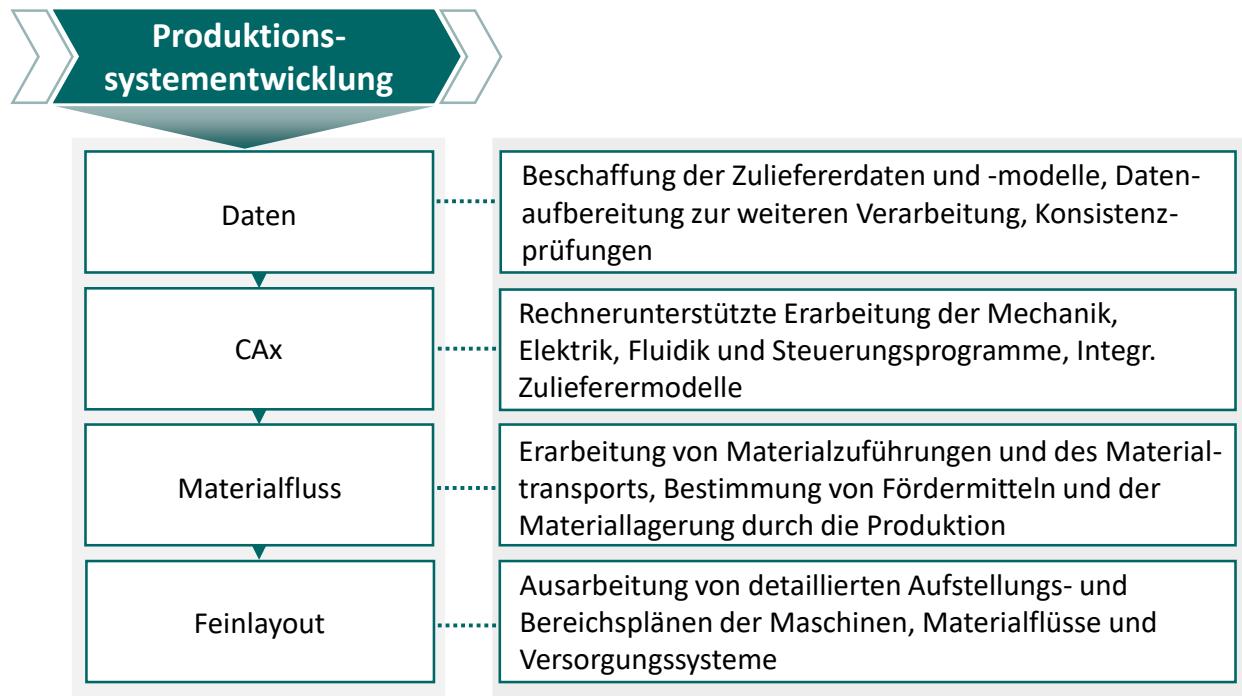


Abbildung 2.2-3. Phasen der Produktionssystementwicklung.

2.2.3 Produktionssystemrealisierung

Die Realisierungsphase des Produktionsentstehungsprozesses schließt sich der Entwicklungsphase an und unterteilt sich, entsprechend *Abbildung 2.2-4*, in die Prozesse Errichten, Inbetriebnahme und Produktionsstart. Die inhaltliche Beschreibung dieser Phasen orientiert sich an den Arbeiten (Weber, 2006; Weber, 2019), in denen thematisch sehr umfassend Aspekte der Inbetriebnahme von verfahrenstechnischen Anlagen dargestellt werden.

Die Phase **Errichten** umfasst nach (Weber, 2006, S. 11) alle Tätigkeiten, die von der Eröffnung der Baustelle bis zum Beginn der Inbetriebnahme der Anlagen erforderlich sind. Wesentliche Aufgaben beinhalten den mechanischen Bau und die Montage der Anlagenbestandteile, beginnend mit einer Grobmontage, die zur Aufstellung der Hauptausrüstung dient. Weitere Tätigkeiten lassen sich neben der eigentlichen Produktionsanlage auch für deren Peripherie formulieren. Konkrete Arbeiten umfassen nach (Weber, 2019, S. 17) die Rohrleitungsmontage, die Elektrotechnik-Montage sowie weitere Fachmontagen, die sich aus den Bereichen der Prozessanalysetechnik, Belüftung oder auch Beschilderung zusammensetzen. Für einen

detaillierten Einblick in die Arbeitsumfänge der Errichtungsphase wird auf (Weber, 2006, S. 11, 185-273) verwiesen, worin die Thematik auch im Kontext einer Inbetriebnahme-Vorbereitung erarbeitet wird.

Die **Inbetriebnahme** der Anlagen schließt sich der Errichtung an und umfasst alle Tätigkeiten, die der mechanischen Fertigstellung der Anlage folgen (Weber, 2019, S. 19). Diese Tätigkeiten vereinen physisch erstmalig die Entwicklungsdisziplinen Mechanik, Elektrik und die Automatisierungstechnik während der Produktionsentstehung. Konkrete Inhalte der Inbetriebnahme beginnen mit der Abarbeitung von Protokollpunkten, die zur Überprüfung der Qualität der mechanischen Fertigstellung dienen und sich vor allem mit Sicht- und Funktionsprüfungen der Anlagen befassen. Hierunter fallen Prüfungen, die die mechanische Unversehrtheit sowie Dichtheit nach der Medien Befüllung der Anlagen sicherstellen.

Im weiteren Verlauf der Inbetriebnahme werden vereinzelt Teifunktionen und Sicherheitseinrichtungen kontrolliert. Im Anschluss können zunächst Anlagenbestandteile und später der gesamte Anlagenverbund angefahren werden, um die Funktionalität gegenüber den Steuerungsbausteinen und der Peripherie zu validieren. Das Ziel des Anfahrens ist die Überprüfung, die Optimierung und die Stabilisierung des dynamischen Verhaltens sowie des internen Stoff- und Energieflusses der Anlage und Anlagenkomponenten. Nach (Weber, 2019, S. 510-511) folgt auf das Anfahren und Stabilisieren der Anlage das Hoch- und Einfahren. Das Hochfahren der Anlage beschreibt den Zeitpunkt der schrittweisen Erhöhung der Anlagenkapazität bis zum geplanten Nennzustand mit dem Ziel der Identifizierung von Kapazitätsengpässen und der weiteren Stabilisierung der Anlage (Wünsch, 2008, S.14; Zeugträger, 1998, S. 28). Während des Einfahrprozesses werden die Steuerungs- und Regelungseinrichtungen sukzessive auf Automatikbetrieb umgestellt und in Messfahrten validiert. Aus den Messfahrten können darüber hinaus, Erkenntnisse über das Anlagenverhalten gewonnen und spezifische Verbräuche ermittelt werden (Weber, 2019, S. 511). Diese Erkenntnisse werden nach der Einfahrt und dem sich anschließenden Abfahren der Anlage, also dem Herunterfahren der Anlagenkapazität, zur weiteren Optimierung und Beseitigung von festgestellten Mängeln genutzt.

Die Anlage wird im weiteren Verlauf der Inbetriebnahme in den vertraglich vereinbarten Zustand wiederangefahren. Eine Leistungsfahrt dient zur Abnahme der Anlagen auf Grundlage eines

Leistungsnachweises und repräsentiert den Zeitpunkt der erfolgreichen Inbetriebnahme und die Möglichkeit für einen **Produktionsstart** (Zeugträger, 1998, S. 8). Im Anschluss wird die Anlage in den Produktionsbetrieb und in die Verantwortung des Käufers überführt. Je nach Projektablauf können mehrmalige Wiederholungen einzelner Phasen möglich sein. In (Weber, 2019, S. 509) werden Beispiele für Inbetriebnahme-Abläufe vorgestellt, wovon in einem Beispiel nach drei Anfahrversuchen und mehreren Nachbesserungen mit der Stabilisierung der Anlage fortgefahren werden konnte.

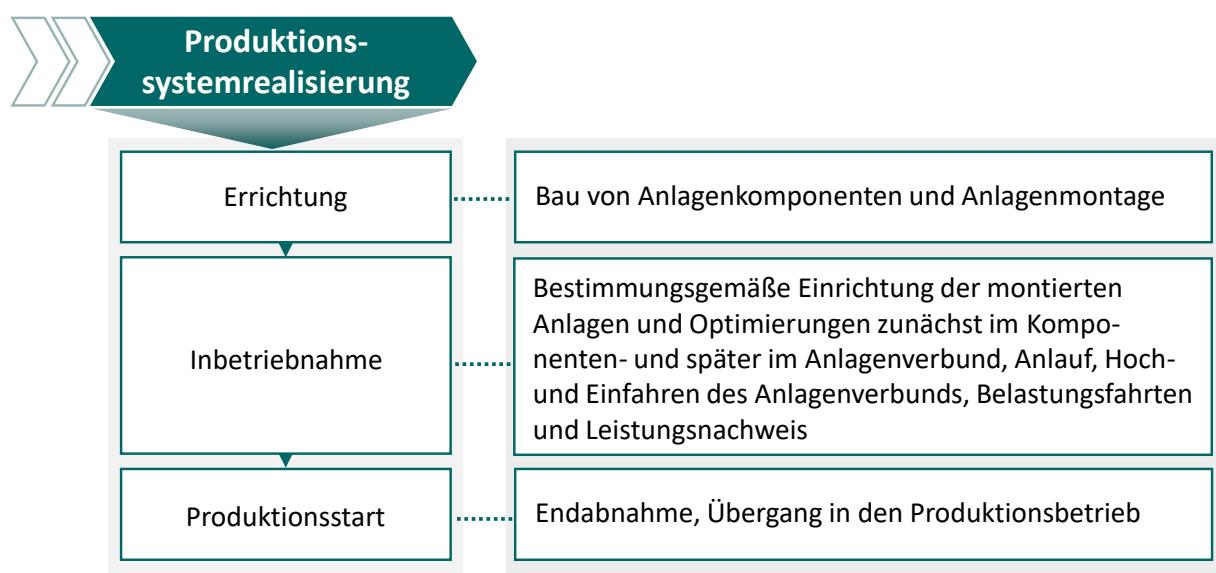


Abbildung 2.2-4. Phasen der Produktionssystemrealisierung in Anlehnung an (Weber, 2006; Weber, 2019).

2.2.4 Einordnung in den Produktentstehungsprozess

Nachdem die vorhergehenden Kapitel den Produktionsentstehungsprozess vor allem inhaltlich zusammengefasst darstellen, wird der Produktionsentstehungsprozess in diesem Kapitel gegenüber dem Produktentstehungsprozess eingeordnet. Auf eine detaillierte Betrachtung der Tätigkeiten innerhalb der Phasen der Produktentstehung wird in dieser Arbeit auf (Burr, 2008, S. 32-82) verwiesen, da sich diese Arbeit konkret auf Teilespekte der Produktionsentstehung konzentriert. Für eine genauere Einordnung ist zunächst der Produktentstehungsprozess zu untergliedern. Entsprechend der Unterteilung des Produktionsentstehungsprozesses in die Phasen Planung, Entwicklung und Realisierung bildet der Produktentstehungsprozess das produktseitige Pendant und unterteilt sich in die Produktplanung, Produktentwicklung und

Produktrealisierung. Nach (Burr, 2008, S. 33; Bellgran & Säfsten, 2010, S. 5-6; VDI 4499, 2008, S. 10) beginnt der Produktionsentstehungsprozess mit einem zeitlichen Entstehungsversatz zur Produktentstehung, wobei die Größe des Versatzes maßgeblich nach Tätigkeitsumfang und -inhalt vor allem in der Produktplanung beeinflusst wird. In (Burr, 2008, S. 35) werden unterschiedliche Definitionen des Produktentstehungsprozesses mit verschiedensten Tätigkeitsumfängen vorgestellt. Diese Arbeit folgt dem Ansatz und ordnet die Phase der Produktionssystemplanung mit einem zeitlichen Entstehungsversatz zur Produktplanungsphase ein. Es folgen die parallelen Phasen der jeweiligen Entwicklungstätigkeiten für Produkt und Produktion. Während die Produktion in der Realisierungsphase errichtet wird, eine Inbetriebnahme und einen Prozess zum Leistungsnachweis durchläuft, beschreibt die Produktrealisierungsphase bereits den darauffolgenden Prozess, also die Herstellung des Produkts durch Nutzung des realisierten Produktionssystems entsprechend *Abbildung 2.2-5*.

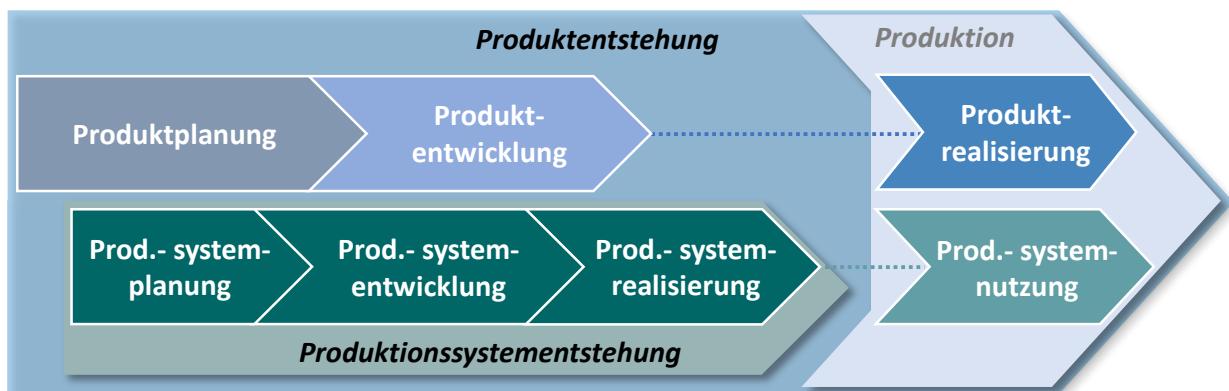


Abbildung 2.2-5. Einordnung der Produktionssystementstehung in die Produktentstehung in die Produktion
Anlehnung an (Burr, 2008, S. 33; Bellgran & Säfsten, 2010, S. 5-6; VDI 4499, 2008, S. 10).

2.3 Virtuelle Inbetriebnahme

Die Arbeit verfolgt die übergeordnete Zielstellung zu untersuchen, in welchem Umfang sich die virtuelle Inbetriebnahme dazu eignet, cyber-physische Produktionssysteme in zukünftigen Entwicklungsprozessen technischer Einrichtungen zu berücksichtigen. Damit bildet die virtuelle Inbetriebnahme ein wesentliches Handlungsfeld dieser Arbeit, weshalb in diesem Kapitel die Entstehung aus historischer Sicht, die Ziele sowie der Aufbau und die Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme näher erläutert werden. Eine Einordnung der virtuellen Inbetriebnahme in den Produktionsentstehungsprozess schließt dieses Kapitel.

2.3.1 Entstehungsgeschichte der virtuellen Inbetriebnahme

Der Grund für den Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme in heutigen Produktionsentstehungsprozessen fand seinen Ursprung während der dritten industriellen Revolution. Die dritte industrielle Revolution ist durch den Einzug von teil- oder vollautomatisierten Arbeitsschritten in bisher zwar elektrifizierte jedoch noch von manueller Arbeit geprägte Produktionen gekennzeichnet. Möglich wurde dies durch Fortschritte in der Informationstechnik, die Integration von Elektronik und später durch speicherprogrammierbare Steuerungen. Letzteres dient heute zur Steuerung hochautomatisierter Anlagen und Maschinen und entstand bereits Ende der 60er Jahre mit dem damaligen Ziel, umfangreiche Relaissteuerungen durch umprogrammierbare Steuerungen zu ersetzen und damit das physische Umverdrahten bei Anpassungsbedarf in der Steuerung zu vermeiden (*Bliesener et al., 1997, S. 2*).

Heutige speicherprogrammierbare Steuerungen profitieren von der enormen Entwicklung in vielen technologischen Bereichen. Vor allem die Möglichkeiten von Mikroprozessoren und die Miniaturisierung kostengünstiger Speicherelemente führen zu einem reduzierten Platzbedarf bei gleichzeitig hoher Zuverlässigkeit. Speicherprogrammierbare Steuerungen bestehen aus meist mehreren Bausteinen, auch Baugruppen, die sich wiederum entsprechend ihrer Funktionen klassifizieren lassen. So übernehmen Eingangsbausteine die Aufnahme digitaler oder analoger Eingangsgrößen, die von Prozessoren in CPU-Bausteinen verarbeitet und über Ausgangsbausteine als elektrische Stellgrößen an Maschinen oder Anlagen weitergeleitet werden. Die Entscheidung, welche Eingangsgrößen zu welchen Ausgangsgrößen führen, wird im CPU-Baustein auf Grundlage des Steuerungsprogramms getroffen. Das Steuerungsprogramm wird innerhalb des Produktionsentwicklungsprozesses erarbeitet und variiert in dessen Tiefe und Komplexität je nach Speicherkapazität und Funktionalität der gewählten Steuerungskomponenten, Aufgabenumfang und Anlagenkomplexität.

Mit zunehmender Tiefe und Komplexität steigt das Potential von Fehlerfällen in den zu entwickelnden Steuerungsprogrammen (*VDI-EFRA, 1990, S. 54-55*). Hinzu kommt, dass entstehende Anlagen und Maschinen oft als Unikat zu betrachten sind, weshalb auftretende Fehler während der Anlagenrealisierung trotz identisch angewandter Verfahren bei vergleichbaren Anlagen und Maschinen keine Seltenheit sind (*Weber, 2006, S. 6*). Entscheidend wird dann sein, zu welchem Zeitpunkt die verursachten Fehler beseitigt werden können. Denn

der zeitliche Verzug zwischen Fehlerentstehung und Fehlerbehebung hat einen erheblichen Einfluss auf die Kostenentwicklung während der Produktionsentstehung (Hengel, 1994, S. 14). Die entstehenden Kosten setzen sich vor allem aus den einzuleitenden Änderungsmaßnahmen zur Fehlerbeseitigung, dem Zeitpunkt der Änderungsdurchführung und dem daraus resultierenden zusätzlichen Zeitaufwand zur Änderungsbearbeitung zusammen (Aßmann, 1998, S. 208-210).

In Abbildung 2.3-1 ist dieser Zusammenhang dargestellt. Demnach steigt die Fehlerhäufigkeit in frühen Entwicklungsphasen. Die Überschneidung der beiden Kurven zeigt, dass eine sofortige Fehlerbehebung möglich ist. Jedoch ist die Häufigkeit dieser Möglichkeit stark abhängig von der Entdeckungswahrscheinlichkeit der Fehler. Oft lassen sich Fehler erst im systematischen Zusammenhang aller Komponenten erkennen, also in späten Phasen der Anlagenentstehung. Der Großteil der Änderungen, vor allem in späten Phasen wie der Inbetriebnahme, finden ihren Ursprung im Anforderungsmanagement und dem Entwurf der programmierten Software zur Steuerung zukünftiger technischer Einrichtungen (VDI-EFRA, 1990, S. 51-52).

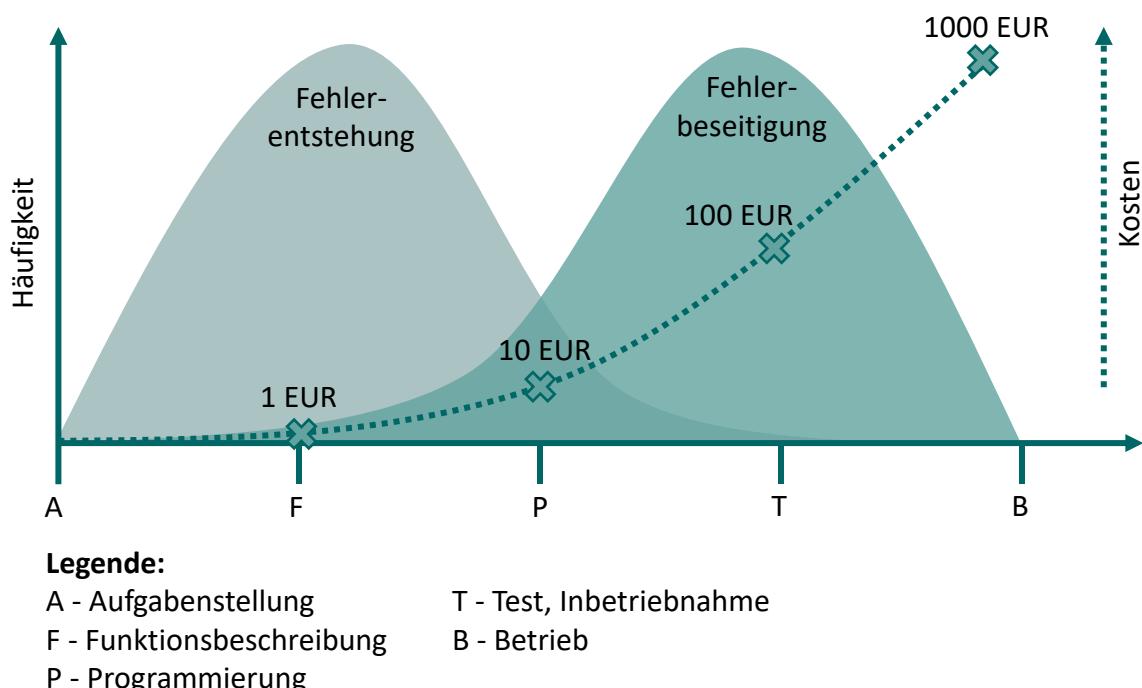


Abbildung 2.3-1. Softwareseitige Fehlerentstehung und -beseitigung in programmierten Steuerungsbausteinen in Anlehnung an (Brökelmann, 2015, S. 32; Weck, 2001, S. 151; Oestreicher, 1986, S. 42) und Entwicklung der Änderungskosten in Abhängigkeit vom Änderungszeitpunkt nach (Aßmann, 1998, S. 210).

Nach (*VDI-EFRA, 1990, S. 49; Aßmann, 1996, S. 16; Sossenheimer, 1989, S. 44*) sind bis zu 90% der geleisteten Arbeitszeit während der Inbetriebnahme auf Arbeiten an der Elektrik „*als Folge umfangreicher Tätigkeiten zur Behebung von Softwarefehlern*“ zurückzuführen. Hieraus ergab sich der Bedarf an geeigneten Vorgehensweisen, die die erarbeitete Software bereits während der Entwicklungsphase validieren. Das Ziel dieser Vorgehensweisen ist es, einen hohen Reifegrad der Software schon in der Entwicklungsphase sicherzustellen und dadurch kostenintensive Änderungen spät im Entstehungsprozess zu reduzieren oder vollständig vermeiden zu können. Neben präventiven verfahrensbasierten Vorschlägen wie dem Befolgen von Regeln während der Programmierung oder der Modularisierung der SPS-Programme wurden im Laufe der Zeit vermehrt rechnerunterstützte Ansätze für simulationsbasierte Validierungen verfolgt. Zu Beginn wurden physische Ein-/Ausgangssimulatoren verwendet und an die Steuerungsbausteine zur funktionalen Validierung im Sinne einer Vor-Inbetriebnahme angeschlossen. Die zu dieser Zeit noch völlig aus Hardware-Komponenten bestehenden Prüfaufbauten konnten, dank der Fortschritte in der Softwareentwicklung, nach und nach durch virtuelle Modelle der geplanten Anlagen ersetzt werden. Die Verwendung von nicht physisch vorhandenen, also virtuellen, Anlagenmodellen, zu Zwecken der funktionalen Validierung von SPS-Programmen, führte letztendlich zu der Begrifflichkeit der virtuellen Inbetriebnahme.

2.3.2 Definition, Zielstellung und Vorteile einer virtuellen Inbetriebnahme

Die (*VDI 3693-1, 2015, S. 4*) definiert die virtuelle Inbetriebnahme als eine:

„Inbetriebnahme, die das entwicklungsbegleitende Testen einzelner Komponenten und Teifunktionen des Automatisierungssystems mithilfe von auf die jeweilige Aufgabenstellung abgestimmten Simulationsmethoden und -modellen umfasst“.

In Ergänzung dazu wird in (*VDI 4499-2, 2011, S. 11-14*) erläutert, dass die „*virtuelle Inbetriebnahme der realen Inbetriebnahme vorgelagert*“ ist und „*beispielsweise die Planungsergebnisse zu Taktzeiten oder Verfügbarkeit einer Anlage*“ absichert. Diese Arbeit folgt dieser Definitionscombination und definiert die vollständig simulationsbasierte virtuelle Inbetriebnahme zusammenfassend in *Definition D2.3-1* als eine Vorverlagerung von entscheidenden konstruktions- und funktionstechnischen Entwicklungs- und

Optimierungsmerkmalen in den Bereich der Produktionsentwicklungsphase (*Illmer & Vielhaber, 2017, S. 299*).

Definition D2.3-1:

Die **virtuelle Inbetriebnahme** dient zur simulationsbasierten Validierung von zukünftig geplanten Systemfunktionalitäten und erzeugt damit eine Vorverlagerung von entscheidenden konstruktions-, funktions- und prozesstechnischen Entwicklungs- und Optimierungsmerkmalen in den Bereich der Produktionsentwicklungsphase (vgl. *Illmer & Vielhaber, 2017, S. 299*).

Das übergeordnete Ziel der virtuellen Inbetriebnahme ergibt sich aus der für diese Arbeit getroffenen Definition. Demnach wird die virtuelle Inbetriebnahme in erster Linie dazu verwendet, während der Produktionsentwicklungsphase entwickelte Steuerungsprogramme zukünftig existierender Anlagen, auf Basis von virtuellen Modellen, durch Ablaufsimulationen zu validieren. Dabei soll das dynamische Verhalten von Anlagen funktional validiert und Ablaufehler in entwickelten Steuerungsprogrammen identifiziert werden (*VDI 4499-2, 2011, S. 13*). Durch den Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme ergeben sich für die Anwender aus verschiedensten Perspektiven Vorteile.

Aus Sicht der Ingenieure bieten sich neben der Identifikation von logischen oder Kopierfehlern im Steuerungsprogramm auch Möglichkeiten zur Bestimmung von Anlagenparametern wie Taktzeit, Ausbringung und Verfügbarkeit (*VDI 4499-2, 2011, S. 13; Kufner, 2012, S. 31; Spath & Landwehr, 2000, S. 293*). Darüber hinaus schafft die Visualisierung der Anlagen ein einheitliches Verständnis über systemische Zusammenhänge durch sämtliche operative Bereiche, die an der Produktionsplanung und -entwicklung beteiligt sind (*Kiefer & Bergholz, 2006, S. 2-5*).

Aus der wirtschaftlichen Perspektive bietet vor allem die Vorverlagerung von inhaltlichen Aufgaben der realen Inbetriebnahme in den Produktionsentwicklungsprozess Vorteile. Somit können während der virtuellen Inbetriebnahme Aufgaben durchgeführt werden, die ohne virtuelle Inbetriebnahme, erst während der realen Inbetriebnahme validiert werden könnten. Das Resultat ist ein zum Zeitpunkt der Produktionsrealisierungsphase wesentlich höherer Reifegrad der entstehenden Anlage im Allgemeinen und des Steuerungsprogramms im

Besonderen. Die Folge ist ein verringelter Optimierungsbedarf während der realen Inbetriebnahme, der in einer zeitlichen Aufwandsreduzierung endet und somit einen entscheidenden wirtschaftlichen Vorteil bieten kann. In einer experimentellen Feldstudie konnten die benötigten Qualitätsanforderungen der Steuerungsprogramme zum Betreiben einer Beispielanlage ohne virtuelle Inbetriebnahme nur zu 37% erfüllt werden (*Wünsch, 2006, S. 1-6; Zäh et al., 2006, S. 596-597*). Mit der Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme konnte die Qualität der Steuerungsprogramme auf 84% gesteigert und die Zeit der realen Inbetriebnahme um 75% reduziert werden (*Wünsch, 2006, S. 1-6; Zäh et al., 2006, S. 595-599*).

2.3.3 Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme

Die Möglichkeit zur Validierung von Steuerungsprogrammen zukünftig geplanter Anlagen mittels virtueller Inbetriebnahme wird in einer simulationsgestützten Entwicklungsumgebung realisiert. Innerhalb der Entwicklungsumgebung werden virtuelle Darstellungen, auch virtuelle Modelle, von geplanten Anlagen modelliert, die in einen für die virtuelle Inbetriebnahme nutzbaren Zustand überführt werden müssen. Für diese Überführung hat sich in der Literatur eine Prozedur, bestehend aus vier Schritten, der CAD-Modellierung und -Modellbeschaffung, Kinematikerstellung, Verhaltensmodellierung und Steuerungsprogrammierung, etabliert, die auch in dieser Arbeit zur Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme verwendet wird (*Ko et al., 2013, S. 134; Lee & Park, 2014, S. 215; Mortensen & Madsen, 2018, S. 95*). Die Ziele der einzelnen Schritte werden nachfolgend erläutert.

Im **ersten Schritt** werden die Computer-Aided Design (CAD) Modelle der geplanten Anlagen und Komponenten auf Aktualität sowie Vollständigkeit geprüft (*Spitzweg, 2009, S. 11*). Die CAD-Modelle entstammen häufig verschiedenen Quellen, die sich aus externen Herstellern, Systemzulieferern und mehreren Bereichen der Inhouse-Entwicklungen etwa Mechanik, Elektronik und Fluidik zusammensetzen. Die Beschaffung der Modelldaten sowie deren Zusammenführung und Aufbereitung für die Integration in die Simulationsumgebung ist das Ziel des ersten Schrittes.

Da die CAD-Modelle zu diesem Zeitpunkt noch starre Repräsentationen in einer virtuellen Entwicklungsumgebung sind, werden sie im **zweiten Schritt** mit Bewegungsinformationen angereichert (*Spitzweg, 2009, S. 8-9, 20*). Das Ziel ist die Erstellung einer Kinematik, die relative

Bewegungen zwischen einzelnen virtuellen Baugruppen zulässt und durch die Angabe numerischer Grenzwerte limitiert ist. In der Praxis wird das durch die Definition von Schub- und Drehgelenken zwischen mindestens zwei Elementen, auch Glieder, erreicht (*Lacour, 2011, S. 36*). Durch die Integration der Kinematik in starre CAD-Modelle besteht für den Anwender die Möglichkeit, schon zu diesem Zeitpunkt Erreichbarkeiten von Baugruppen sowie Kollisionen zwischen einzelnen Komponenten festzustellen.

Im **dritten Schritt** werden die erstellten numerischen Bewegungsreferenzen in einen zeitlichen Kontext gesetzt. In der Literatur wird dieser Schritt als die Verhaltensmodellbildung oder auch Prozessmodellierung bezeichnet (*Kiefer, 2007, S. 112-114, 125; Spitzweg, 2009, S. 9; Kufner, 2012, S. 28-29; Brökelmann, 2015, S. 35*). Dieser Schritt hat das Ziel, zukünftig geplante Produktionsprozesse innerhalb der virtuellen Entwicklungsumgebung abzubilden. Die virtuellen Produktionsprozesse können das Verfahren des Produkts durch die Produktion oder Bearbeitungsprozesse von Betriebsmitteln darstellen. Allen virtuellen Prozessen gemein ist die Erstellung und Nutzung von virtuellen Pfaden und Wegpunkten, an denen die Ausführung der Bewegungen gebunden ist (*Lacour, 2011, S. 37-39*). Die Entscheidung, zu welchem Zeitpunkt ein Prozess ausgeführt wird, kann zeit- oder ereignisdiskret erfolgen. Die Ausführung einer Prozesssimulation kann zur Validierung der erstellten virtuellen Prozesse und Erreichbarkeiten zeitdiskret erfolgen und in einem Gant-chart organisiert werden.

Im **vierten Schritt** werden den virtuellen Produktionsprozessen Funktionsaufrufe in der Simulationsumgebung zugeordnet, die aus Sicht der Automatisierung genutzt werden können, um während der virtuellen Inbetriebnahme einzelne Prozesse zu starten oder zu stoppen. Gleichzeitig werden die Steuerungskomponenten entsprechend der Funktionsanforderungen in einer Automatisierungssoftware ausgewählt. Die Automatisierungssoftware wird anschließend zur Entwicklung des Steuerungsprogrammes genutzt. Ziel dieses Schrittes ist die Entwicklung eines in der Praxis nutzbaren Steuerungsprogramms, dessen Funktionsaufrufe mit denen der Simulation korrespondieren und im weiteren Verlauf durch die virtuelle Inbetriebnahme funktional validiert werden können.

2.3.4 Durchführung und Aufwand-Nutzen-Betrachtung der virtuellen Inbetriebnahme

Die **Durchführung** der virtuellen Inbetriebnahme erfolgt durch die Verknüpfung der digitalen Anlagenmodelle aus der Simulationsumgebung mit dem entwickelten Steuerungsprogramm aus der Automatisierungssoftware. Je nach Art und Weise der vorliegenden und zu validierenden Steuerungsprogramme wird in der Literatur zwischen mehreren Konfigurationen zur Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme unterschieden (*Puntel Schmidt, 2017, S. 49-50; VDI/VDE 3693 Blatt 1, 2016, S. 5-6*). Nachfolgend werden die drei Konfigurationen Model-in-the Loop, Software-in-the-Loop und Hardware-in-the-Loop erläutert.

Die Model-in-the-Loop (MiL) Konfiguration besteht aus der Verknüpfung von virtuellen Anlagenmodellen in der Simulationsumgebung und prototypisch implementierten Steuerungsalgorithmen, die unabhängig von der Zielhardware ausgeführt und in frühen Phasen der Entwicklung zur Konzeption von Steuerungsprogrammen verwendet werden (*Hansen et al., 2017, S. 1538; Puntel Schmidt, 2017, S. 49*).

Die Software-in-the-Loop (SiL) Konfiguration besteht aus der Verknüpfung von virtuellen Anlagenmodellen in der Simulationsumgebung und ebenfalls virtuell vorliegender Steuerungsprogramme, die innerhalb einer Automatisierungssoftware ausgeführt werden können. Die SiL-Konfiguration verwendet zunächst eine emulierte, also eine der Realität angenäherte und damit hardwareunabhängige Steuerung (*Brökelmann, 2015, S. 61; Puntel Schmidt, 2017, S. 49-50*). Die Auswahl entsprechender Hardwarekomponenten, auf die das entwickelte Steuerungsprogramm übertragen werden kann, findet in nachgelagerten Prozessen statt.

Die Hardware-in-the-Loop (HiL) Konfiguration beschreibt die Verwendung von realen, also physisch vorhandenen, Steuerungen und deren Anbindung an die virtuellen Anlagenmodelle in der Simulationsumgebung (*Lindworsky, 2011, S. 40-41; Kufner, 2012, S. 26*). Durch den Konfigurationsaufbau ergibt sich zwar ein höherer Zeitaufwand gegenüber der SiL-Konfiguration, jedoch kann der verwendete Steuerungsbaustein nach der Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme an den realen Anlagen genutzt werden. Der zeitliche Aufwand zur Durchführung von Schnittstellen- und Hardwaretests zwischen Steuerungsbausteinen und der Anlagensysteme während der realen Inbetriebnahme kann als Folge der bereits validierten

Steuerungskomponenten reduziert werden. Die Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme, entsprechend *Kapitel 2.3.3*, der Aufbau der Konfigurationen und die Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme stellen während der Produktionsentstehungsphase einen zusätzlichen Arbeits- und Zeitaufwand dar. Daher ist vor jedem Projekt auf Basis einer **Aufwand-Nutzen-Betrachtung** zu entscheiden, ob die Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme in einem vertretbaren, also wirtschaftlichen, Aufwand-Nutzen Verhältnis steht. Der Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme ergibt sich aus den vorgestellten Vorteilen aus *Kapitel 2.3.2* und steht dem Aufwand der Vorbereitung, Konfiguration und Durchführung gegenüber. In *Tabelle 2.3-1* sind die konkreten Inhalte von Aufwand und Nutzen einer virtuellen Inbetriebnahme in Anlehnung an (*Lindworsky, 2011, S. 46*) dargestellt und werden durch Inhalte aus den *Kapiteln 2.3.2 bis 2.3.4* ergänzt.

Tabelle 2.3-1. Nutzen und Aufwand einer virtuellen Inbetriebnahme mit Ergänzungen nach (Lindworsky, 2011, S. 46).

Nutzen
<ul style="list-style-type: none">• Inkrementelle Softwareentwicklung• Entwicklungsbegleitende Validierungsmöglichkeit von Steuerungsprogrammen• Zerstörungsfreie Prüfung und Reproduktion von Fehlerszenarien• Höherer Reifegrad der Steuerungssoftware vor Produktionssystemrealisierung• Funktionale Absicherung von physischen Steuerungskomponenten und Schnittstellen in der Produktionsentwicklungsphase• Verkürzung der realen Inbetriebnahme• Schulungs- und Präsentationsmöglichkeiten
Aufwand
<ul style="list-style-type: none">• Modellbeschaffung und Modellierungsaufwand• Konfigurationsaufwand• Einsatz von geschultem Personal• Beschaffung und Betrieb von Simulationssoftware und -hardware

2.3.5 Einsatz und Grenzen der virtuellen Inbetriebnahme in der Automobilbranche

Die Einsatzmöglichkeiten einer virtuellen Inbetriebnahme sind vielfältig, da speicherprogrammierbare Steuerungen in verschiedensten industriellen Bereichen Anwendung finden. Die nachfolgende Betrachtung des Einsatzes der virtuellen Inbetriebnahme beschränkt sich auf die Automobilbranche. Für eine weiterführende Betrachtung von Projekten außerhalb dieser Branche wird auf (*Kövari, 2011, S. 29-31*) verwiesen, der neben der Automobilbranche auch Projekte in den Bereichen der Papier- und Textilindustrie, Werkzeugmaschinen und Logistik vorstellt.

In (*Batra, 2007, S. 8-9*) wird der Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme am Beispiel der automobilen Hochzeit im BMW-Werk Spartanburg im Staat South Carolina der USA vorgestellt. Im Mittelpunkt des Berichts steht die Zusammenführung des Antriebsstranges, also die zu einer übergeordneten Gruppe montierten Komponenten eines Fahrzeugs wie Motor, Getriebe, Achsen, Abgasanlage und Aggregateträger, mit der Komponentengruppe Karosserie. Hierzu wird die Karossiere über eine Hebeeinheit in die Richtung des sich darunter befindlichen Antriebsstranges abgesenkt, wobei der Antriebsstrang gleichzeitig durch ein Scherenhubtisch angehoben wird. Die Herausforderung dabei liegt zunächst in der Ausrichtung von Greifern, Distanzstücken und Führungselementen, die zur gegenseitigen Ausrichtung der beiden Komponentengruppen dienen und gleichermaßen Verbindungselemente, zur automatisierten Verschraubung mittels Robotik, darstellen. Da die Durchführung dieser Prozesse automatisiert erfolgt, wurden während der Entwicklung virtuelle Testläufe und eine virtuelle Inbetriebnahme als Hardware-in-the-loop Konfiguration zur Absicherung der kinematischen Prozesse gegenüber der geplanten Steuerung durchgeführt.

Nach (*Ehrenstraßer, 2006, S. 6-1 - 6-21*) wird die virtuelle Inbetriebnahme bei der Audi AG seit 2004 beispielsweise im Karosseriebau eingesetzt. Das Ziel des damaligen Pilotprojekts war es, Roboterpfade und SPS-Abläufe einer Laserlötstation zu simulieren (*Griesbach et al., 2004, S. 4-19*). Konkrete Folgeprojekte, die eine virtuelle Inbetriebnahme an geplanten Produktionsanlagen berücksichtigen, finden sich insbesondere in der Absicherung von Framing-Stationen. In diesen Framing Stationen werden beispielsweise die Seitenwände und Dachelemente an den Unterboden der Karossiere gefügt. Die Umsetzung erfolgt durch den Einsatz von Industrierobotern, die innerhalb von mehreren Zellen angeordnet, einzelne Teilbereiche der

Türenfertigung automatisiert fügen und in einer virtuellen Entwicklungsumgebung abgebildet sind. Der besondere Fokus dieser Arbeit galt der funktionalen Absicherung der Signalinteraktion zwischen virtuellen Robotern und realen Steuerungskomponenten.

Bei der Daimler-AG wurde 2006 ein Projekt vorgestellt, wobei die virtuelle Inbetriebnahme zur Absicherung des SPS-Steuerungsprogrammes ebenfalls im Bereich des Karosseriebaus verwendet wurde (*Kiefer & Bergholz, 2006, S. 2-1 – 2-20*). Ganz konkret handelt es sich bei dem Anwendungsfall um eine automatisierte Fertigungszelle, die aus einem Industrieroboter mit montierter Schweißzange und einer Drehvorrichtung zur Aufnahme eines Cockpitträgers aus dem Daimler-Nutzfahrzeug Segment besteht. Im ersten Schritt werden der Cockpitträger und die zu fügenden Bestandteile von Hand in die Drehvorrichtung gesetzt und durch Automatikspanner fixiert. Im zweiten Schritt werden die Bestandteile an den Cockpitträgern durch den MAG-Schweißroboter gefügt. Die Freigabe der gefügten Baugruppe erfolgt nach Beendigung des Schweißprozesses automatisiert. Die automatisierten Prozesse wurden für zwei Varianten in einer Simulation erstellt und gegenüber einer realen SPS-Steuerung funktional abgesichert.

Weitere Anwendungsfälle der virtuellen Inbetriebnahme in Projekten der Daimler AG werden in (*Kiefer & Borutta, 2010, S. 8; Kiefer, 2011, S. 2-4 – 2-5*) als firmeninterne Projekthistorie vorgestellt. Demnach wurden 2005 im Firmensektor Daimler Trucks virtuelle Inbetriebnahmen jeweils für eine Drehtischzelle ohne nähere konkrete Informationen zur Umsetzung und die bereits oben dargestellte Schweißzelle nach (*Kiefer & Bergholz, 2006, S. 2-1 – 2-20*) durchgeführt. Anschließend folgten Projektanwendungen auch für die Sektoren Mercedes Benz Cars und Mercedes Benz Vans, welche schließlich in 2009 zur Entscheidung des Produktiveinsatzes der virtuellen Inbetriebnahme bei der Daimler AG führten.

Die Anwendungen der virtuellen Inbetriebnahme sind neben der Automobilbranche vielfältig. Dennoch hat die Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme Grenzen. So kann eine virtuelle Inbetriebnahme nach (*Dominka, 2007, S. 39-40*) keine Garantie dafür geben, alle Fehler in der Steuerung während der Entwicklung zu identifizieren, da die Zustände zwischen virtuellen und realen Anlagen voneinander abweichen können, wobei die Abweichungsursachen in der gewählten Detaillierung der Modellierung, fehlerhaften Simulationsmodellen oder nicht spezifizierten Änderungen an den realen Anlagen zu suchen sind. Darüber hinaus ist die virtuelle Inbetriebnahme zwar in der Lage elektrische Leitungen und deren Konnektivität in der virtuellen

Umgebung abzubilden, eine fehlerhafte physische Verdrahtung während der realen Inbetriebnahme kann dennoch zum Fehlverhalten der realen Anlage führen. Diese Ansicht wird durch (*Virtuelle Inbetriebnahme, o. D.*) bestätigt, indem der Faktor Mensch und dessen Verhalten als nicht simulierbar eingeordnet werden und die Resultate seines Handelns erst während der realen Inbetriebnahme erkennbar werden.

2.4 Produktionsentstehungsprozess mit virtueller Inbetriebnahme

Nachdem der Produktionsentstehungsprozess in *Kapitel 2.2* und die virtuelle Inbetriebnahme in *Kapitel 2.3* voneinander getrennt vorgestellt wurden, eint dieses Kapitel die zwei Themenfelder, indem es die virtuelle Inbetriebnahme in den Produktionsentstehungsprozess einordnet und deren Auswirkungen auf die Entstehungsphasen in den Vordergrund stellt.

2.4.1 Einordnung der VIBN in den Produktionssystementstehungsprozess

Nach (*Bröckelmann, 2015, S. 99, 135-138*) beginnt die virtuelle Inbetriebnahme mit der Verwertung von Informationen über die zu realisierende Prozessfolge, die in nachgelagerten Schritten zur Erstellung der Verhaltensmodelle dient. Entsprechend der Struktur der Produktionsentstehung können diese Informationen in dieser Arbeit innerhalb der Produktionssystemplanung erarbeitet werden und zur Verfügung stehen. Die virtuelle Inbetriebnahme beginnt daher während der Produktionssystemplanung.

Vor der Modellierung der Produktionssysteme in der virtuellen Entwicklungsumgebung ist zu evaluieren, welche Modelle, welchen Detaillierungsgrad bedürfen. Entscheidend für die Detaillierung kann die Art und Weise sein, wie eine virtuelle Komponente in die Simulation eingebunden ist. Ist die Komponente für die Darstellung und funktionale Validierung des dynamischen Verhaltens des Produktionssystems relevant, so ergeben sich nach (*Brökelmann, 2015, S. 130; Lochbiechler et al., 2012, S. 327-331*) höhere Detaillierungsanforderungen gegenüber Komponenten, deren dynamischen Verhaltensweisen eine eingeschränktere Relevanz besitzen. Für die Beantwortung dieser Fragestellungen, der Vorauswahl der Simulationskonfiguration und -software wird vor der Modellerstellung, entsprechend *Abbildung 2.4-1*, eine Planungsphase der virtuellen Inbetriebnahme etabliert.

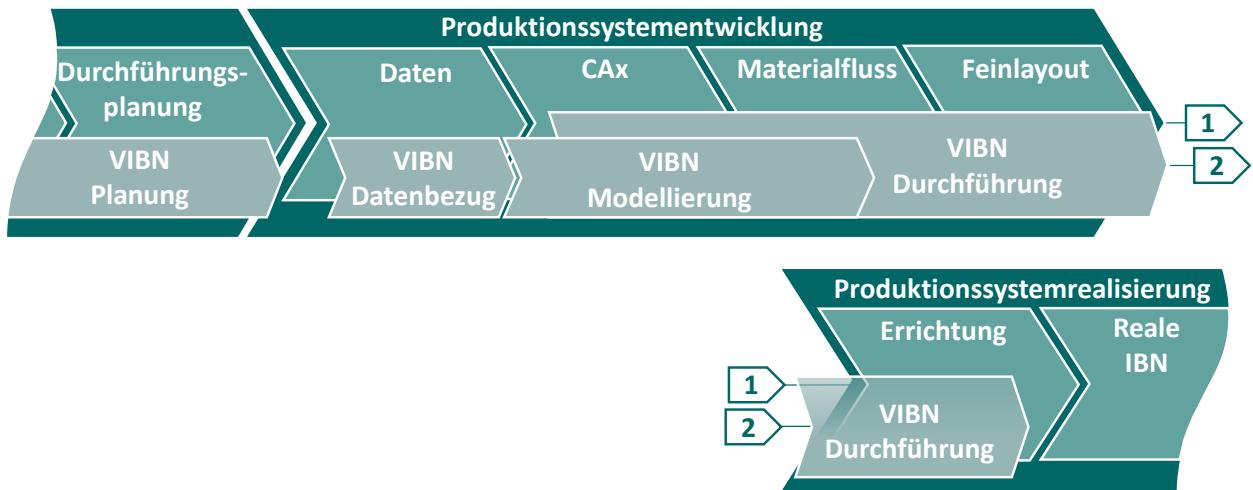


Abbildung 2.4-1. Einordnung der virtuellen Inbetriebnahme in den Produktionsentstehungsprozess in Anlehnung an (Bröckelmann, 2015, S. 82, 135-138).

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, Daten für die Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme von Zulieferern als Erweiterung der extern vergebenen Aufgaben und Dienstleistungen zu erhalten. Externe Daten können häufig kinematische Informationen in Form geometrischer Daten (CAD) oder auch Verhaltensmodelle beinhalten. Der Tätigkeitsumfang der Modellierungsphase wird in dieser Arbeit in *Kapitel 2.3.3* im Rahmen vorbereitender Tätigkeiten der virtuellen Inbetriebnahme vorgestellt. Die Modellierung der virtuellen Inbetriebnahme kann bereits durch die von externen Dienstleistern bereitgestellten Daten und der sukzessiven Erarbeitung der eigenen Konstruktionsdaten während der CAx-Phase beginnen. Die Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme, deren Tätigkeitsumfang in *Kapitel 2.3.4* beschrieben wird, umfasst die eigentliche Ausführung der virtuellen Inbetriebnahme und kennzeichnet die finale Phase des Gesamtprozesses der virtuellen Inbetriebnahme. Die virtuelle Inbetriebnahme kann bereits während der Erarbeitung geometrischer Daten vereinzelter Produktionssystembestandteile erfolgen und erstreckt sich, entsprechend *Abbildung 2.4-1*, bis in die Errichtungsphase der Produktionssystemrealisierung.

2.4.2 Auswirkungen auf die Phasen der Produktionssystementstehung

Die virtuelle Inbetriebnahme hat während der Produktionssystementstehung unterschiedlichste Auswirkungen auf die in dieser Arbeit definierten Entstehungsphasen. Diese Auswirkungen

werden vor allem den Einfluss der virtuellen Inbetriebnahme auf Prozessebene beschreiben und die Benefits aus Gesamtprozesssicht verdeutlichen.

Während der Produktionssystemplanung kann bereits entschieden werden, ob und in welcher Art und Weise eine virtuelle Inbetriebnahme durchgeführt wird und welche zukünftig existierenden Produktionssysteme während der Entwicklungsphase durch eine virtuelle Inbetriebnahme funktional abgesichert werden sollen (*VDI 3693-2, 2018*). Darüber hinaus können Aufgabenumfänge, die während der Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme durchgeführt werden, also beispielsweise eine Optimierung der Layouts mittels Kollisions- und Erreichbarkeitsuntersuchungen, bereits in der Planungsphase festgelegt werden. Diese Aspekte können neben der Festlegung der Simulationskonfigurationen aus *Kapitel 2.3.4*, der Wahl der gewünschten Detaillierungstiefe der verwendeten Simulationsmodelle oder der Auftragserarbeitung und Bestellung notwendiger Soft- und Hardware zu einem zusätzlichen Arbeitsaufwand während der Planungsphase der Produktionssystementstehung führen. Der zusätzliche Zeitaufwand dieser Aufgabenumfänge lässt sich jedoch aufgrund der schwierigen Vergleichbarkeit von Projekten und deren Arbeitsumfängen, nur uneindeutig und nicht verallgemeinernd quantifizieren.

Die größten Auswirkungen der virtuellen Inbetriebnahme ergeben sich im Sinne eines zusätzlichen Arbeitsaufwandes während der Entwicklungsphase der Produktionssystementstehung (*Lindworsky, 2011, S. 46*). Die Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme, also die Beschaffung und Vorbereitung notwendiger Daten sowie die Modellierung der Anlagenkinematik und des Anlagenverhaltens entsprechend *Kapitel 2.3.3*, beinhaltet die zeitintensivsten Arbeitsumfänge während des Einsatzes der virtuellen Inbetriebnahme. Gleichzeitig entsteht bereits zu diesem Zeitpunkt die Möglichkeit, geometrische Unzulänglichkeiten in Form von Kollisionen oder Unerreichbarkeiten durch kinematische Simulationen der Produktionssysteme entsprechend den Ausführungen nach (*Lacour, 2011, S. 37-39; Kufner, 2012; S. 26*) festzustellen.

Die anschließende Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme umfasst einen zusätzlichen Arbeitsschritt, mit dem Ziel, das entwickelte Steuerungsprogramm gegenüber dem virtuellen geometrischen Anlagenverhalten zu validieren. Hieraus ergibt sich nach der Validierung der kinematischen Simulation der Produktionssysteme die Möglichkeit, die Steuerungsprogramme

zu validieren und Fehlersituationen bereits in der Entwicklungsphase zu erkennen und zu beseitigen (Illmer & Vielhaber, 2018, S. 510). Die Folge ist eine Verschiebung des Zeitpunktes der Fehlererkennung und Fehlerbeseitigung, ausgehend von der, aus Sicht der Produktionssystementstehung, späten Phase der Inbetriebnahme in den Zeitraum der Produktionssystementwicklung. Diese Verschiebung der Fehlerbeseitigung ist in Abbildung 2.4-2 dargestellt und zeigt die Potentiale zur Reduzierung der Fehlerbeseitigungskosten. Während ein Großteil der entstandenen Fehler ohne virtuelle Inbetriebnahme erst in der Inbetriebnahmephase entdeckt und kostenintensiv beseitigt werden konnten, bietet die Produktionssystementstehung mit virtueller Inbetriebnahme die Möglichkeit, diese Fehler nun während der Entwicklungsphase zu identifizieren und kostengünstiger zu beseitigen (Kiefer, 2007, S. 43; Kövari, 2011, S. 21).

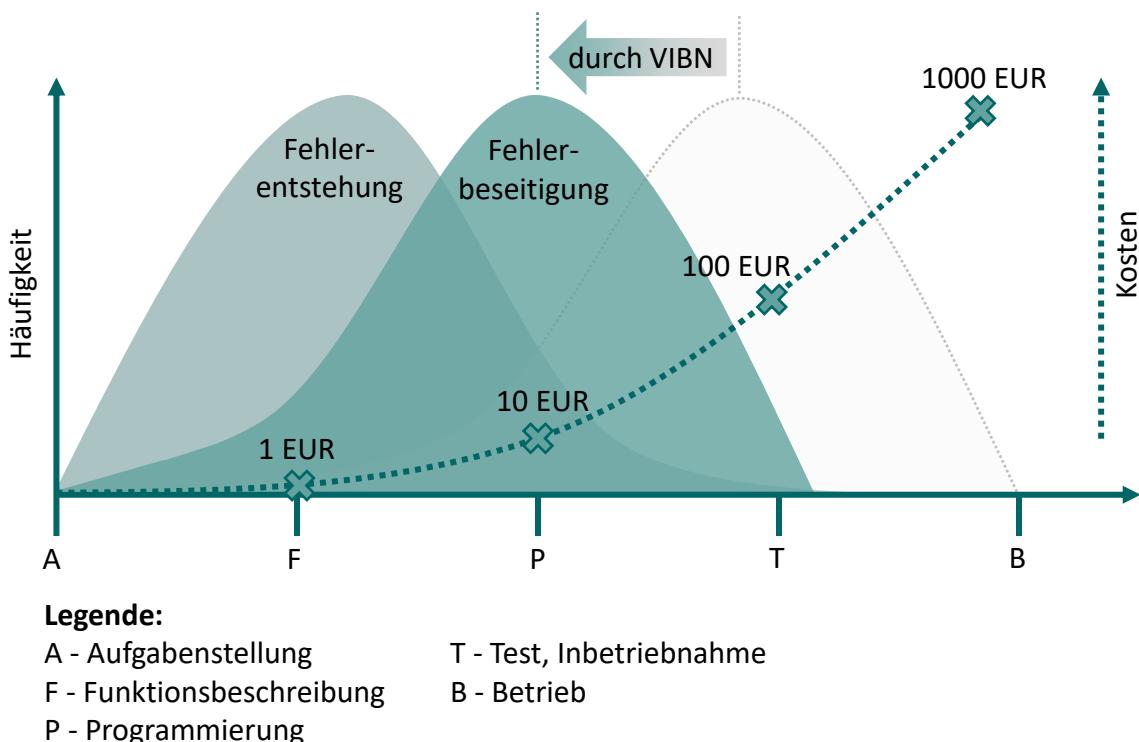
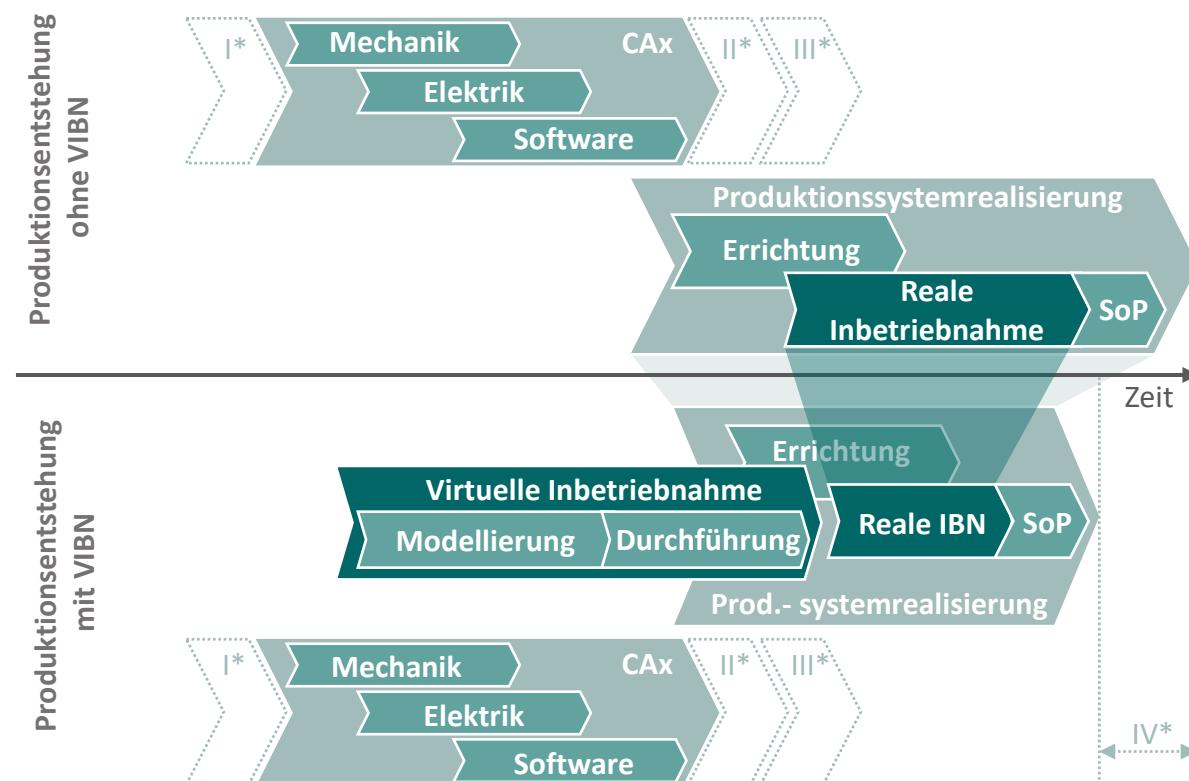


Abbildung 2.4-2. Auswirkungen der virtuellen Inbetriebnahme auf den Zeitpunkt der Fehlerbeseitigung, basierend auf den Darstellungen nach (Brökelmann, 2015, S. 32; Weck, 2001, S. 151; Oestreicher, 1986, S. 42; Aßmann, 1998, S. 210).

Die zusätzlichen Arbeitsaufwände durch den Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme während der Planungs- und Entwicklungsphase der Produktionssystementstehung führen dazu, dass bereits mit dem Start der Produktionssystemrealisierung ein hoher Reifegrad eines zukünftig

existierenden Produktionssystems erzielt wird (Zäh et al., 2004; S. 1-3, 1-19). Der Reifegrad eines Produktionssystemsystems gilt in dieser Arbeit als ein Anhaltspunkt, inwieweit der aktuelle Status eines Produktionssystems im Verlauf der Produktionsentstehung dem zukünftig existierenden und volleinsatzfähigen Produktionssystem in Gestalt und Funktionalität entspricht. Dieser hohe Reifegrad hat zur Folge, dass die reale Inbetriebnahme wesentlich verkürzt werden kann (Meyer, 2014, S. 17). Die Verkürzung der realen Inbetriebnahme als Folge des Einsatzes der virtuellen Inbetriebnahme ist in *Abbildung 2.4-3* schemenhaft dargestellt.



*Indizes:

- I = Datenbeschaffung
- II = Materialflussentwicklung
- III = Feinlayoutentwicklung
- IV = zeitliches Einsparpotential

Abbildung 2.4-3. Auswirkungen der virtuellen Inbetriebnahme auf die Phasen der Produktionsentstehung, adaptierte Darstellung nach (Griesbach et al., 2004, S. 4-20; Ehrensträßer, 2006, S. 6-13).

Der Vergleich der Prozesse der Produktionssystementstehung ohne und mit virtueller Inbetriebnahme zeigt darüber hinaus, dass die Verkürzung der realen Inbetriebnahme auch Auswirkungen auf die übergeordneten Phasen hat. Die Realisierungsphase kann soweit verkürzt werden, dass sich der Gesamtprozess der Produktionsentstehung, trotz des durch die virtuelle Inbetriebnahme entstehenden Mehraufwands, ebenfalls verkürzt (Wünsch, 2008, S. 82). Die virtuelle Inbetriebnahme hat somit umfangreiche Auswirkungen auf den Produktionssystementstehungsprozess im Gesamten als auch gesondert in seinen einzelnen Phasen.

Aus Sicht der Planungsphase der Produktionssystementstehung ergeben sich gegenüber den nachgelagerten Phasen vergleichsweise geringere Auswirkungen im Sinne einer Einsatzplanung der virtuellen Inbetriebnahme und Festlegung einzelner Aufgabenumfänge.

Innerhalb der Entwicklungsphase der Produktionssystementstehung steht der zusätzliche zeitliche Arbeitsaufwand der Vorbereitung und Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme im Vordergrund und den Möglichkeiten der frühen Fehlererkennung und -beseitigung gegenüber.

Der Tätigkeitsumfang der Realisierungsphase der Produktionssystementstehung kann durch den Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme als Folge einer Verkürzung der realen Inbetriebnahme reduziert werden. Somit hat der Einsatz einer virtuellen Inbetriebnahme umfangreiche Auswirkung auf die gesamte Produktionssystementstehung und kann einen Beitrag für eine funktionale Absicherung deutlich vor der kostenintensiven realen Inbetriebnahme bieten.

3 Stand der Technik in Forschung und Industrie

Das *dritte Kapitel* erläutert den Stand der Technik aus der Perspektive der Forschung und Industrie. Ziel dieses Kapitels ist es, einen Einblick in aktuelle sowie zurückliegende Arbeiten aus dem Umfeld der Forschung und der Industrie zu erhalten, die sich mit den Themenbereichen virtuelle Inbetriebnahme sowie cyber-physische Produktionssysteme befassen und als repräsentativ für die Gesamtfelder eingeordnet werden.

3.1 Gliederung und Fokus

Die Themenbereiche virtuelle Inbetriebnahme und cyber-physische Produktionssysteme werden aus den Perspektiven der Forschung und der Industrie zunächst getrennt voneinander betrachtet. Hierzu werden im ersten Schritt Arbeiten vorgestellt, die aktuelle und teilweise etablierte Unternehmungen im Bereich der virtuellen Inbetriebnahme verdeutlichen. Im zweiten Schritt werden Arbeiten diskutiert, die Planung, Entwicklung und Realisierung von cyber-physischen Produktionssystemen untersuchen. Daran anknüpfend wird der Fokus im dritten Schritt auf existierende Arbeiten gelegt, die eine kombinierte Themenbetrachtung unternehmen und damit die Möglichkeiten zur virtuellen Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen untersuchen. Hierzu bilden Arbeiten aus der Forschung, die als Dissertationen, Abschlussarbeiten oder Konferenzbeiträgen veröffentlicht sind, die Grundlage der Untersuchung. Den Stand der Technik aus der Perspektive der Industrie bilden in weiten Teilen ebenfalls wissenschaftliche Veröffentlichungen, die durch Autoren mit einem industriellen Hintergrund verfasst worden sind, ab.

3.2 Virtuelle Inbetriebnahme

In diesem Kapitel werden Arbeiten und Forschungsansätze, teilweise stark zusammengefasst vorgestellt, die den Prozess der virtuellen Inbetriebnahme als Bestandteil der jeweiligen formulierten Zielstellung diskutieren. Einen wesentlichen Bestandteil werden die Einsatzgebiete der virtuellen Inbetriebnahme sowie die Ausprägungen der validierten Produktionssysteme darstellen. Es werden Arbeiten aus der Forschung (*Kapitel 3.2.1*) und der Industrie (*Kapitel 3.2.2*) zunächst vorgestellt und, daran anknüpfend, unter zu definierenden Kriterien im Rahmen einer zusammenfassenden Betrachtung (*Kapitel 3.3.3*) gegenübergestellt.

3.2.1 Stand der Forschung

Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen (Brökelmann, 2015)

Brökelmann untersucht, wie die virtuelle Inbetriebnahme in den Anlagenentstehungsprozess integriert und frühzeitig berücksichtigt werden kann. Dazu beschreibt der Autor den Aufbau des Anlagenentstehungsprozesses in Form eines Vorgehensmodells und untergliedert dessen Phasen mehrfach. Zur Erarbeitung der konkreten Phaseninhalte verwendet Brökelmann existierende und zum Teil auf den Fokus der Arbeit angepasste Methoden, Ansätze und Werkzeuge.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird eine Methode zur Modularisierung von Anlagen und eine Methode zur Wahl geeigneter Modellierungstiefen in der virtuellen Inbetriebnahme vorgestellt (Brökelmann, 2015, S. 105-122, 128-130; Schmüdderrich et al., 2013, S. 44-46; Lochbiechler et al., 2012, S. 4). Gegenstand der Validierung der vorgestellten Methoden und Ansätze ist ein flexibles Materialflusssystem zum Transport unterschiedlicher Werkstücke, die in variierenden Prozessreihenfolgen hergestellt werden (Brökelmann, 2015, S.97). Der Autor untergliedert auch den Prozess der virtuellen Inbetriebnahme mit Fokus auf die Modellierung, die in der Durchführung bereits erste Validierungen, jeweils auf Grundlage der verwendeten Modellierungstiefe, zulässt und eine frühe Einbindung der virtuellen Inbetriebnahme während der Anlagenkonzipierung ermöglicht. Als Konsequenz der detaillierten inhaltlichen Beschreibung des Anlagenentstehungsprozesses und der virtuellen Inbetriebnahme ergeben sich für Brökelmann Schnittstellen zwischen den Phasen der beiden Prozesse. Die Schnittstellen werden im Ergebnis der Arbeit verdeutlicht und ermöglichen eine frühe Berücksichtigung der virtuellen Inbetriebnahme im Anlagenentstehungsprozess (Brökelmann, 2015, S.137).

Bewertung der Dissertation von Brökelmann in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Brökelmann erarbeitete eine detaillierte Systematik zur Beschreibung der wesentlichen Anforderungen an eine virtuelle Inbetriebnahme. Obwohl sich die Bezeichnung der Phasen gegenüber der in dieser Arbeit getroffenen Einordnung unterscheiden, können übereinstimmende Ansichten in deren inhaltlichen Beschreibungen identifiziert werden. Während der Fokus von Brökelmann auf Materialflusssysteme gesetzt ist, wird sich in dieser Arbeit auf die produktbearbeitenden Bestandteile der Produktion fokussiert.

Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme (Scheifele, 2019)

In der Arbeit von Scheifele wird untersucht, wie Simulationen unter Verwendung detaillierter Produktionsmodelle, trotz des Bedarfs einer erhöhten Rechenleistung, echtzeitfähig und im Rahmen einer virtuellen Inbetriebnahme als Hardware-in-the-loop Konfiguration simuliert werden können (*Scheifele, 2019, S. 8*).

Scheifele verfolgt als Lösungsansatz den Aufbau einer Co-Simulationsplattform, die durch eine Aufteilung der Simulationsaufgaben auf verschiedene Partitionen, also Prozessorteilbereiche eines Rechners, gekennzeichnet ist. Dadurch können höhere Rechenleistungen zu einer besonderen Performance in der Durchführung parallelisierter Simulationsaufgaben führen und die Anforderungen an eine echtzeitgesteuerte Simulation erfüllen. Die sich dadurch ergebenen Herausforderungen bestehen für Scheifele zunächst in der Partitionierung des Produktionsmodells und der anschließenden Verknüpfung der aufgeteilten Modelle. Scheifele entscheidet sich an dieser Stelle für eine Aufteilung der Co-Simulationsplattform in zwei Bereiche. Die Bereiche unterscheiden sich in ihrer Verarbeitung von Simulationsaufgaben mit Echtzeitanforderung und ohne Echtzeitanforderung. Die Entscheidung, in welchen der Bereiche eine Simulationsaufgabe durchgeführt werden soll, wird durch die in den Teilmodellen hinterlegten Partitionsparameter bestimmt und mittels eines Partitionierungsmechanismus koordiniert. Zur Verknüpfung der Teilmodelle mit verschiedenen Zeitanforderungen werden Koppelsignale angelegt, die zu definierten Zeitpunkten in der Ablaufsteuerung synchronisiert und koordiniert werden.

Der Einsatz der erarbeiteten Co-Simulationsplattform wird im Resultat der Arbeit, anhand einer physikbasierten Materialflusssimulation, validiert und zusammenfassend als erfolgreich bewertet (*Scheifele, 2019, S. 125-127*).

Bewertung der Dissertation von Scheifele in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Die von Scheifele vorgestellte Plattform erweitert die Anwendungsmöglichkeiten der virtuellen Inbetriebnahme auf berechnungsintensive Simulationen. Der Fokus liegt auf der Aufteilung und Verknüpfung einzelner Simulationsaufgaben und weniger auf einer methodischen Vorbereitung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen, wie es in dieser Arbeit angestrebt wird.

Methoden zur simulationsbasierten Absicherung von Steuerungscode fertigungstechnischer Anlagen (Puntel-Schmidt, 2017)

Puntel-Schmidt verfolgt die Erarbeitung von Methoden für einen effizienten Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme im Engineering-Prozess. Hierzu definiert der Autor Leitfragen, die die Datenbasis für eine virtuelle Inbetriebnahme identifizieren, Grundsätze zur Umsetzung einer virtuellen Inbetriebnahme adressieren und Möglichkeiten einer automatisierten Simulationsmodellerstellung prüfen (Puntel-Schmidt, 2017, S. 51-55).

Puntel-Schmidt orientiert sich an der in (VDI 4499-1, 2015, S. 12) beschriebenen Anlagenstruktur, die in Produkt, Prozess und Ressourcen aufgeschlüsselt ist, in dem standardisierten Datenaustauschformat AutomationML beschrieben wird und zur Identifizierung der Datengrundlage dient (Puntel-Schmidt, 2017, S. 14). Hieraus leitet der Autor eine Simulationsmodellbibliothek ab, die auf die Anlagenstrukturdaten zurückgreift (Puntel-Schmidt, 2017, S. 111-121). Daran anknüpfend definiert der Autor mögliche Detaillierungsstufen und die methodische Wahl eines adäquaten Detaillierungsgrades, wobei jedoch der höchste Detaillierungsgrad einer einzelnen Komponente innerhalb eines Moduls den Gesamtdetailierungsgrad des Modules bestimmt (Puntel-Schmidt, 2017, S. 148).

Eine zentrale Herausforderung bildet die Interaktionsmöglichkeit von Modulen mit unterschiedlichem Detaillierungsgrad. Durch die Einführung von Modellverbindern wird die Konsistenz zwischen Modellen mit unterschiedlicher Detaillierung sichergestellt. Puntel-Schmidt erarbeitet darauf aufbauend einen generischen Modellgenerierungsalgorithmus zur vollautomatischen Modellgenerierung, der anhand einer Fördertechnikapplikation validiert wird. Die in der Zielstellung der Arbeit definierten Leitfragen beschreibt der Autor zusammenfassend als erfüllt.

Bewertung der Dissertation von Puntel-Schmidt in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Der Autor konzentriert sich auf die Voraussetzungen und den Aufbau einer Möglichkeit zur vollautomatischen Simulationsmodellbildung, wobei eine bestehende Anlagenstruktur die Grundlage bildet. Eine vertiefende Betrachtung der gegebenen Anlagenstruktur und deren Auswirkungen auf den, in dieser Arbeit definierten, Modellbildungsprozesses der virtuellen Inbetriebnahme ist jedoch nicht Bestandteil der Zielstellung von Puntel-Schmidt.

Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen (Lacour, 2011)

Lacour verfolgt die Zielstellung, die physikbasierte virtuelle Inbetriebnahme, um materialflussintensive Produktionsanlagen, die durch eine besondere Anlagengröße und der darin geförderten Produkte in Anzahl und Varianz gekennzeichnet sind, zu ergänzen und bereits in frühen Entwicklungsphasen der Anlagen zu berücksichtigen (Lacour, 2011, S. 4-5).

Um dies zu erreichen, strebt Lacour eine frühestmögliche Betrachtung der virtuellen Inbetriebnahme bereits in der Anlagenkonzeptionsphase und in Form eines abstrakten Modells der kinematischen Struktur an (Lacour, 2011, S. 57-58). Eine weitere Anforderung ist die Einführung einer bereichsorientierten und skalierbaren Detaillierung der Anlagenmodelle, damit Anlagen mit einem großvolumigen Fördergutanteil innerhalb einer Simulationsanwendung dargestellt werden können (Lacour, 2011, S. 58). Diese Detaillierung wird durch eine Modularisierung der Simulationsmodelle erreicht und mittels Entwurfsmetaphern realisiert. Entwurfsmetaphern definieren die Grenzen der Darstellung der Simulationsbereiche, indem die Platzierung einer Quelle in der Simulation die virtuelle Erzeugung des Förderguts darstellt und eine Senke die Entfernung desselbigen bedeutet. Zur Erarbeitung einer materialflussintensiven und physikbasierten virtuellen Inbetriebnahme wird ein Modellbildungsprozess, bestehend aus fünf Schritten, vorgestellt. Im Wesentlichen werden die CAD-Modelle der Anlage im ersten Schritt mittels Triangulation stark vereinfacht, in visuelle, statische und dynamische Modellgruppen klassifiziert und in ein Kollisionsmodell überführt. Dabei führt die konvexe Zerlegung, also die stark vereinfachten Darstellungen der Oberflächen der Anlagenmodelle, nach Lacour zu einer deutlichen Reduzierung der Berechnungsdauer pro Simulationsschritt (Lacour, 2011, S. 88). Im Resultat der Arbeit validiert Lacour das vorgestellte Vorgehen anhand einer Transport- und Gruppieranlage und ordnet den Ansatz als potenziell wirtschaftlich ein.

Bewertung der Dissertation von Lacour in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Lacour beschäftigt sich mit der Ausrichtung der virtuellen Inbetriebnahme auf berechnungsintensive Anlagensimulationsmodelle. Die Komplexität ergibt sich jedoch nicht aus dem abzubildenden Produktionssystem, sondern durch den abzubildenden Umfang der gesamten Produktionsanlage. Der Autor stellt Möglichkeiten zur Kinematisierung der zu simulierenden Anlagen vor, die teilweise auch in dieser Arbeit Anwendung finden können.

Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen (Kufner, 2011)

In der Arbeit von Kufner wird untersucht, wie eine automatisierte Maschinenmodellerstellung aus bestehenden Engineering-Dokumenten realisiert werden kann. Der Autor erarbeitet dazu eine Methode zur automatisierten Erstellung einer Anlagenstruktur und eine Methode zur automatisierten Verhaltensmodellerstellung für Bauteile der betrachteten Anlage. Eine zentrale Voraussetzung ist für Kufner die vollständige Darstellung der Maschine, um auf dieser Basis die Maschinenbestandteile entsprechend des Umfangs ihrer Funktionalität zu klassifizieren und in unterschiedlichen Modellierungstiefen abzubilden. Kufner unterscheidet dabei in Bauteile und Baueinheiten, wobei Bauteile, beispielsweise ein Ventil, einfache Teilfunktionen übernehmen und Baueinheiten mehrere Funktionen in einer Art Bauteilgruppe vereinen (Kufner, 2012, S. 18).

Das Lösungskonzept von Kufner sieht zunächst eine automatisierte Strukturmodellerstellung der Anlage und, daran anknüpfend, eine automatisierte Verhaltensmodellerstellung für die Bauteile vor (Kufner, 2012, S. 82-83). Die Verhaltensmodelle der Baueinheiten entstammen einer Bibliothek und werden dem Maschinenmodell separat und manuell hinzugefügt. Die Grundlage der automatisierten Modellbildung bilden die steuerungsseitige Busstruktur, eine Eingabe-Ausgabe Liste für das Strukturmodell der Anlage sowie die Standardfunktionen und der Stromlaufplan für die Verhaltensmodelle der Bauteile (Kufner, 2012, S. 83). Die Methode zur automatisierten Erstellung der Anlagenstruktur stützt sich auf die Ableitung von genormten Referenzkennzeichen, die im Zusammenhang mit den Strukturprinzipien nach (DIN EN 81346-1:2010-05) eine Systematik ergeben, in der auch die Zuordnung der Anlagenkomponenten berücksichtigt ist (Kufner, 2012, S. 88). Nach Kufner wurden die Methoden erfolgreich an unterschiedlichen Montagemaschinen validiert.

Bewertung der Dissertation von Kufner in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Kufner möchte mit seinem Ansatz das Aufwand-Nutzenverhältnis während der Verhaltensmodellerstellung einer virtuellen Inbetriebnahme methodisch verbessern. Kufner beschränkt sich mit dieser Methode auf einzelne Bauteile, stellt jedoch manuelle Lösungen für Baugruppen vor. Die übersichtliche Beschreibung der betrachteten Anlagen lässt weitergehende Fragen in der konkreten Anwendung offen und erschwert eine Substitution der betrachteten Anlagen durch cyber-physische Produktionssysteme.

Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme (Wünsch, 2008)

Wünsch untersucht eine aus drei Teilzielen bestehende Aufgabenstellung. Die Teilziele bestehen aus einem unternehmensorientierten Einführungsvorgehen der virtuellen Inbetriebnahme, einer Methode zur wirtschaftlichen Optimierung des Einsatzes der virtuellen Inbetriebnahme und einer Methode zur Modellbildung, die neben den virtuellen Anlagenmodellen auch die benötigte Rechenleistung berücksichtigt (Wünsch, 2008, S. 7-8, 165-167).

Das Einführungsvorgehen stützt sich auf die von Wünsch definierten Anforderungen an die Unternehmensorganisation, die aus einem systematischen Erfahrungsrückfluss aus der realen Inbetriebnahme, der strikten Bewahrung einer Datenkonsistenz und die Vollständigkeit digitaler Datensätze bestehen. Diese Anforderungen repräsentieren Ebenen des Einführungsplans. Durch eine Einschätzung wird der unternehmerische Stand im Einführungsplan ermittelt und das weitere Vorgehen zur virtuellen Inbetriebnahme bestimmt (Wünsch, 2008, S. 166).

Die Methode zur wirtschaftlichen Optimierung der virtuellen Inbetriebnahme sieht eine Zerlegung des Produktionssystems vor, die dann die Entscheidungsgrundlage bildet, ob die unternehmenseigene virtuelle-Inbetriebnahme-Abteilung aus Sicht ihrer technischen und personellen Möglichkeiten optimal auf die betrachteten Projekte vorbereitet ist (Wünsch, 2008, S. 87).

Das dritte Teilziel sieht eine Methode zur Werkzeugwahl einer auf die virtuelle Inbetriebnahme ausgerichteten Unternehmensabteilung innerhalb eines Lösungsbaukastens vor. Die Besonderheit liegt nach Wünsch vor allem in der Möglichkeit, die Abteilung auf unternehmensindividuelle Anforderungen abzustimmen und damit eine Grundlage zur Wahl ihrer technischen Ausrichtung zu ermöglichen.

Bewertung der Dissertation von Wünsch in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Wünsch betrachtet ein Technologiekonzept für eine virtuelle Inbetriebnahme von komplexen Produktionssystemen, die er als die Verschaltung einzelner Anlagen und deren Abstimmung auf einen gemeinsamen Steuerungstakt umschreibt. Im Sinne cyber-physischer Produktionssysteme ist die Komplexität jedoch schon auf Ebene der einzelnen Anlagensegmente zu erwarten, weshalb eine Abstraktion des Vorgehens auf diese Arbeit als nicht sinnvoll erachtet wird.

Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen (Spitzweg, 2009)

In der Arbeit von Spitzweg steht die Berücksichtigung physikalischer Effekte während der virtuellen Inbetriebnahme im Vordergrund. Um physikalische Effekte berücksichtigen zu können, ist der Aufbau einer Simulationsplattform das übergeordnete Ziel seiner Arbeit. Hierzu formuliert der Autor methodische und technische Anforderungen an eine Simulationsumgebung mit physikalischen Modellen. Diese bestätigen, zumindest aus methodischer Perspektive, die Ansichten von (Wünsch, 2008) und umfassen eine konsistente Datenbasis, die grundsätzliche Existenz digitaler Informationen, also beispielsweise Geometrie-, Massen- oder Schwerpunktangaben, der Produktionsanlagen (Spitzweg, 2009, S. 63-64).

Aus technischer Sichtweise ergeben sich für Spitzweg besondere Anforderungen, beispielsweise bei der Integration von Sensoren und Gelenken, einer Kollisionserkennung oder einer kurzfristigen Anpassbarkeit der einzelnen Simulationsszenen. Die Anlagenmodelle reichert Spitzweg durch Konfigurationsdateien mit physikalischen Informationen an. Die Konfigurationsdateien enthalten einem Objekt zugeordnete Informationen über dessen Geometrie, physikalische Merkmale wie auch Lage.

Die als Zielstellung der Arbeit formulierte Erarbeitung einer Simulationsplattform besteht aus mehreren Softwaremodulen und dient als Konfigurationswerkzeug für die Simulationserstellung (Spitzweg, 2009, S. 85-104). In der konkreten Verwendung der Plattform wird zunächst ein Visualisierungsmodell für die Simulationsberechnung vereinfacht und dann mit physikalischen und kinematischen Informationen angereichert. Spitzweg validiert diesen Ansatz anhand mehrerer materialflussorientierter Projekte nach eigenen Angaben erfolgreich.

Bewertung der Dissertation von Spitzweg in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Spitzweg konzentriert sich auf die Einbindung von physikalischen Parametern in die virtuelle Inbetriebnahme. Während zur Zeit der Ausarbeitung der Arbeit von Spitzweg die Einbindung physikalischer Merkmale in die virtuelle Inbetriebnahme noch Gegenstand der Forschung war, wird diese Einbindung aktuell bereits von Softwareanbietern im Softwarekonvolut angeboten. In dieser Arbeit wird auf die Darstellung physikalischer Größen im Zusammenhang mit cyber-physischen Produktionssystemen aufgrund des thematischen Umfangs verzichtet.

On Virtual Commissioning of Manufacturing Systems – Proposals for a systematic VC simulation study methodology and a new simulation model building approach (Hoffmann, 2016)

Gegenstand der Zielstellung in der Arbeit von Hoffmann ist ein systematischer Ansatz zur Reduzierung des Modellierungsaufwandes vor der virtuellen Inbetriebnahme, wobei dessen Ansatz besonders den Bereich der Fertigungssysteme „Kleiner und Mittelständischer Unternehmen“ (KMU) adressieren soll (Hoffmann, 2016, S. 19). Hierzu untersucht Hoffmann Anforderungen an eine virtuelle Inbetriebnahme, wobei der Autor verdeutlicht, dass neben notwendigen Planungsdaten und der Wahl der Simulationskonfiguration, vor allem prinzipielle Fragestellungen, also beispielsweise die Klärung des Sachverhalts, der mittels virtueller Inbetriebnahme abzusichern ist, bereits beantwortet sein sollen (Hoffmann, 2016, S. 104-106).

Im zweiten Schritt unterscheidet Hoffmann in der Vorgehensweise zwischen einer Low-Level Komponentenmodellierung und einer High-Level-Anlagenmodellierung. In der High-Level-Anlagenmodellierung wird die Möglichkeit verfolgt, Komponenten aus einer Bibliothek iterativ zu Funktionsgruppen und später zu Subsystemen miteinander zu kombinieren, wodurch der Anwender in aufeinander aufbauenden Prozeduren komplexe Anlagenmodelle aufbauen kann. Die Basis dieser Prozedur bilden die Komponenten in den jeweiligen Bibliotheken. Die Komponenten werden in einem Modellierungsverfahren, wie in Kapitel 2.3.3 beschrieben, erarbeitet (Hoffmann, 2016, S. 121-122).

Den Kern der Arbeit stellen in Phasen gegliederte Vorgehensmodelle dar, die in Summe eine Gesamtprozedur, bestehend aus der Erstellung simulationsfähiger Subkomponenten und die iterative Erstellung der Anlagenmodelle durch die Kombination der Submodelle aus den Modellbibliotheken heraus, ergibt. Diese Gesamtprozedur bewertet Hoffmann an einem flexiblen roboterbasierten Montagesystem als erfolgreich (Hoffmann, 2016, S. 198).

Bewertung der Dissertation von Hoffmann in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Hoffmann erarbeitet eine Modellbildungssystematik als begleitende Prozedur zur Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme. Die Vorgehensmodelle sind an einem, von Hoffmann als komplex bewertetem, Produktionssystem validiert worden. Das Vorgehensmodell berücksichtigt jedoch keine weiterführenden Schritte, die neben den betrachteten mechatronischen Systemen auch zukünftige komplexe Produktionssysteme berücksichtigt werden könnten.

Weitere aktuelle und zurückliegende Forschungsarbeiten und -ansätze

Ansätze nach Mortensen et al., 2017; Mortensen & Madsen, 2018; Mortensen & Madsen, 2019

Das Ziel in (*Mortensen et al., 2017*) ist die virtuelle Inbetriebnahme rekonfigurierbarer Fertigungssysteme, die während ihres Lebenszyklusses durch ein erhöhtes Änderungspotenzial, einen erhöhten Bedarf an Wiederinbetriebnahmen aufweisen. Die Autoren kategorisieren die Rekonfigurierbarkeit in verschiedene Ausprägungen ihrer Komplexität, also beispielsweise, ob das betrachtete System von einem bekannten Systemzustand in einen ebenfalls bekannten oder unbekannten Systemzustand rekonfiguriert wird. Darüber hinaus definieren die Autoren vier Rekonfigurationseigenschaften, die sich aus der Skalierbarkeit, Konvertierbarkeit, Umstellbarkeit und Umordnungsfähigkeit zusammensetzen. Erstere wird mittels virtueller Inbetriebnahme und mittlerer Komplexität anhand eines Demonstrators aus Autorensicht erfolgreich validiert.

In (*Mortensen & Madsen, 2018*) wird eine Ausbildungsplattform vorgestellt, die die Vorgehensweise und Ziele einer virtuellen Inbetriebnahme in verschiedenen Lernaktivitäten an Studenten vermittelt und anhand eines Demonstrators eine praktische Überprüfung der Arbeitsinhalte erlaubt. Die konkreten Arbeitsinhalte bestehen zunächst in der Modellbildung eines Prozessmodules, dessen Steuerungscode mittels virtueller Inbetriebnahme validiert und, daran anknüpfend, in die reale Demonstrator-Umgebung für die reale Inbetriebnahme überführt wurde. Im zweiten Teil der Arbeit sollten die Auswirkungen eines rekonfigurierbaren Fertigungssystems auf die virtuelle Inbetriebnahme hin untersucht werden. Die Herausforderung lag darin, die Möglichkeit, ein neues Produkt durch das Fertigungssystem herzustellen, zu überprüfen, und die Notwendigkeit einer Betriebsleitebene zur Planung der Operationsabfolgen zu verdeutlichen.

Die Autoren nutzen die in (*Mortensen et al., 2017*) definierten vier Rekonfigurationsklassen sowie die erarbeiteten Rekonfigurations-Komplexitäten, um in (*Mortensen & Madsen, 2019*) eine Methode, bestehend aus vier Schritten, vorzustellen, die Anwender bei der Hardware und Software Rekonfiguration eines Fertigungssystems in Form von Handlungsanweisungen unterstützen soll. Die Methode sieht die Nutzung einer Tabelle vor, in der die vier Rekonfigurationsklassen den Rekonfigurations-Komplexitäten gegenübergestellt werden und für jede Kombination Handlungsanweisungen formuliert sind, in welcher Art und Weise Arbeiten an der Hardware, Software sowie virtuellen und realen Inbetriebnahme zu berücksichtigen sind.

Ansatz nach Roman et al., 2018

In der Arbeit von (*Roman et al., 2018*) wird untersucht, wie ein bereits existierendes Produktionssystem, bestehend aus CNC-Fräsmaschinen, die über ein Fördersystem miteinander und mit einem Lagersystem verbunden sind, durch einen Prozess einer Qualitätsprüfung ergänzt werden kann. Im konkreten Anwendungsfall wird hierzu eine zusätzliche Station zur Durchführung der Qualitätsprüfung an das Fördersystem angebunden, wobei das Ziel des Autors die Absicherung der Prozessintegration mittels virtueller Inbetriebnahme ist. Die Qualitätskontrolle besteht darin, die geforderte Toleranz eines Bohrungsdurchmessers einer Grundplatte zu ermitteln und bei Nichterfüllung der Toleranz eine Aussortierung der betroffenen Produkte durch einen Industrieroboter vorzunehmen. Durch die virtuelle Inbetriebnahme wurden Erreichbarkeiten, das Verhalten und der Steuerungscode des Greifroboters sowie des Fördersystems validiert.

Ansätze nach Schamp et al., 2018; Schamp et al., 2019

In (*Schamp et al., 2018*) untersuchen die Autoren das Potenzial der virtuellen Inbetriebnahme auf Maschinenebene und in Verbindung mit einem virtuellen Zwilling der betrachteten Anlage. Der virtuelle Zwilling wird in der Arbeit von (*Schamp et al., 2018*) synonym zum digitalen Zwilling verwendet und ist, den Autoren zu Folge, durch die ergänzende Einbindung einer Physik-Engine zur Darstellung physikalisch beeinflusster Verhaltensweisen gekennzeichnet. Anhand eines kleinen Automatisierungsprojektes untersuchten die Autoren den zeitlichen Aufwand, den Studenten, in zwei Gruppen aufteilt, benötigen, um Fehler im Steuerungsprogramm auf konventionelle Weise und mittels virtueller Inbetriebnahme zu eliminieren. Im Resultat beobachteten die Autoren bei der Gruppe, die die Aufgabe mittels virtueller Inbetriebnahme durchführte, eine signifikante Reduzierung des Zeitaufwands für die Fehlereliminierung sowie wesentliche höhere Softwarequalität in der gleichen zur Verfügung gestellten Zeit von drei Stunden.

Die Untersuchungen in (*Schamp et al., 2019*) verfolgen die Zielstellung, einen Überblick existierender Ansätze über die Nutzung der virtuellen Inbetriebnahme in der Industrie zu erarbeiten und deren Vor- und Nachteile mit den Vor- und Nachteilen des aktuellen Stands der Technik einerseits zu vergleichen und andererseits, darauf aufbauend, einen eigenen Ansatz vorzustellen, der die Vorteile beider Bereiche kombiniert verwendet und deren Nachteile

reduziert. Der vorgeschlagene Ansatz sieht ein durch formale Verifikationstechniken ergänztes digitales Modell der betrachteten Anlage vor. Hierzu hat jeder Bestandteil der Anlage einen virtuellen Repräsentanten, dessen mögliche Zustände bereits vordefiniert sind. Der Anwender trifft die Auswahl der zu betrachtenden Zustände und verbindet im digitalen Modell die Übergänge zu anderen virtuellen Repräsentanten und benötigt, den Autoren nach, kein tiefergehendes Wissen über die formalen Vorgehensweisen zur Erstellung der Systemsteuerung. Dieser Ansatz wird anhand zweier Softwaretools für die virtuelle Inbetriebnahme, den Autoren nach, als im Prinzip erfolgreich eingestuft.

Ansatz nach Rueckert et al., 2020

In (Rueckert et al., 2020) wird untersucht, wie eine Human-In-The-Loop (HITL) Simulationskonfiguration dazu beitragen kann, die, in der (DIN ISO/TS 15066:2017-04) formulierten, Anforderungen an Mensch-Roboter-Kollaborationsanwendungen innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme zu berücksichtigen. Die Autoren haben hierzu zunächst einen Fragenkatalog erstellt, der in der Vorgehensweise beispielsweise den mechanischen Aufbau des Systems erfasst oder sicherstellt, dass Bediener die Bewegungen des kollaborierenden Roboters visuell wahrnehmen können, wodurch dieser Fragenkatalog, in Folge dessen, die Voraussetzungen für eine Inbetriebnahme dieser sicherheitsrelevanten Anlagen auf ihre Erfüllung prüft. Zur Beantwortung der Fragen stellen die Autoren ein Bearbeitungsschema vor, in dem in einzelnen aufeinander aufbauenden Schritten untersucht wird, ob die Erfüllung der Anforderungen mittels konventioneller virtueller Inbetriebnahme, entweder als MIL-, SIL- oder HIL-Simulationskonfiguration, überprüft werden können oder, ob eine gesonderte Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme in Form der HITL-Simulationskonfiguration zur Prüfung der Anforderungserfüllung zu bemühen ist. Zwar ist der zusätzlich zu leistende Aufwand einer HITL-Simulationskonfiguration nicht immer zur Überprüfung der Anforderung nötig, jedoch beschreiben die Autoren ihren zusätzlichen Nutzen, der mit den Systemgrenzen der konventionellen virtuellen Inbetriebnahme beginnt und die Möglichkeit bietet, die Bewegungen eines realen Bedieners durch den Einsatz von Virtual-Reality-Controllern und einem Trackingsystem in die virtuelle Inbetriebnahme zu integrieren.

3.2.2 Stand der Industrie

Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau (Kiefer, 2007) - DaimlerChrysler Forschungszentrum

Kiefer untersucht im Rahmen seiner Dissertationstätigkeit im DaimlerChrysler Forschungszentrum in Ulm die Möglichkeiten, der Entwicklung eines Produkt-Prozess-Ressourcen (PPR)-Datenmodells zur frühzeitigen Betrachtung mechatronischer Ressourcendaten im Projektierungs- und Anlaufprozess automatisierter Fertigungszellen mit dem Fokus auf den PKW-Rohbau im DaimlerChrysler Werk Wörth (Kiefer, 2007, S. 9, S. 121, 138).

Mit dem Einsatz des PPR-Datenmodells möchte Kiefer einen bereichsübergreifenden Planungsmaster bieten, der die einzelnen Fachbereiche gesamtheitlich betrachtet. Aus Sicht der virtuellen Inbetriebnahme dient der Planungsmaster nach Kiefer als Datengrundlage zur gesamtheitlichen Optimierung der Synergie aus Produkt, Prozess und Ressourcen auf Zellenebene (Kiefer, 2007, S. 98). Die Ausgangsbasis für das PPR-Datenmodells bilden die, in der Konzeptionsphase getroffenen, Planungsvorgaben. Diese Planungsdaten werden innerhalb von Datenbanken verwaltet und dienen der Bereitstellung von Informationen, Dokumenten und Modellen während der Fertigungsplanung sowie der Gestaltung des PPR-Datenmodells. Gegenstand der Validierung ist eine Schweißzelle zur Herstellung eines Cockpitträgers in zwei Varianten. Zunächst werden die benötigten Ressourcen aus der Ressourcenbibliothek herangezogen und eine Signalliste auf Basis des erstellten Ressourcenmodells automatisiert abgeleitet, die dann wiederum als Ableitungsgrundlage des Signal-Mappings zwischen Modell und Steuerung dient (Kiefer, 2007, S. 124). Daran anknüpfend wird ein Prozessmodell erstellt, welches die Basis der automatisierten SPS-Programmerstellung bildet. Dieses Vorgehen verbessert das Aufwand-Nutzen Verhältnis der virtuellen Inbetriebnahme deutlich und wird von Kiefer als wirtschaftlich potenzialreich eingestuft (Kiefer, 2007, S. 127).

Bewertung der Dissertation von Kiefer in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Kiefer erarbeitet eine Infrastruktur, die auf eine hohe Wiederverwendung von bestehenden virtuellen Modellen abzielt und sich auch auf Änderungen während des Produktionsbetriebs konzentriert. Bei Eintritt einer Änderung im Produktionsumfeld schlägt Kiefer eine Vorgehensweise in drei Phasen vor, ohne diese jedoch auf komplexere Produktionssysteme zu adressieren. Eine Ableitung der Vorgehensweise für diese Arbeit scheint daher weniger sinnvoll.

Physikbasierte mechanische Absicherung zur energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau (Damrath, 2018) – Daimler AG

Damrath stellt eine Methode vor, die die Energieeffizienz von automatisierten Montageanlagen als Kriterium bereits in der Produktionsplanung berücksichtigt und eine energieeffizientere Auslegung der zukünftig existierenden Anlagen zur Folge haben soll (*Damrath, 2018, S. II, 3-4*).

Die Methode gliedert sich in fünf Phasen, der Modellierung der energiekonsumierenden Ressourcen (Energy-Consumption-Units - ECUs), der Gesamtsystemmodellierung, der Analyse möglicher energieeffizienzsteigender Maßnahmen und deren Implementierung sowie eine abschließende Bewertung der beiden letzten Phasen aus ökonomischen Gesichtspunkten (*Damrath, 2018, S. 88-108*). Die virtuelle Inbetriebnahme dient in der Arbeit von Damrath zur industriellen Nutzbarmachung der vorgestellten Methode (*Damrath, 2018, S. 152*). Die in der Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme modellierten Geometriemodelle des zukünftigen Produktionssystems werden innerhalb des Mechatronic Concept Designers (MCD) - eine Simulationsanwendung der Siemens AG - zur Darstellung physikbasierter Montagesimulationen verwendet und mit den, in der Methode erarbeiteten, ECU-Modellen gekoppelt. Die ECU-Modelle sind in einer Bibliothek abgelegt und werden an die Steuerungseinheiten der jeweiligen Ressourcen angebunden, wobei die Steuerungseinheiten wiederum an die Prozessabfolge geknüpft sind. Im Zentrum der Validierung der Methode stehen eine Wendestation zur Handhabung und Fixierung von Vorderachsen und ein Teilbereich einer automatisierten Arbeitszelle zur Montage von Dachmodulen im Werk Sindelfingen der Daimler AG (*Damrath, 2018, S.129, 135*). In der Bewertung der Arbeit ordnet der Autor die Durchführbarkeit mit idealisierten Annahmen anhand der Anwendungsbeispiele als theoretisch belegt ein (*Damrath, 2018, S. 159*).

Bewertung der Dissertation von Damrath in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Damrath zeigt in seiner Arbeit die Möglichkeiten der virtuellen Inbetriebnahme als Werkzeug für erweiterte Betrachtungen von Produktionssystemen und ihren Eigenschaften. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Erarbeitung von Darstellungsmöglichkeiten cyber-physischer Produktionssysteme als Komplexitätsausprägung innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme. Weiterführende Betrachtungen zur Berücksichtigung der Energieeffizienz von komplexen oder auch cyber-physischen Produktionssystemen sind nicht Bestandteil der formulierten Zielstellung.

Konzeption und Realisierung eines neuen Systems zur produktbegleitenden virtuellen Inbetriebnahme komplexer Förderanlagen (Kövari, 2011) - SEW-EURODRIVE GmbH & Co KG.

Die Arbeit von Kövari untersucht die Integration der virtuellen Inbetriebnahme als produktbegleitende Dienstleistung in einen bestehenden Applikations-Systembaukasten eines Anbieters für Fördersysteme. Aus diesem Applikations-Systembaukasten heraus sollen somit Fördersysteme zunächst konfiguriert und anschließend durch eine virtuelle Inbetriebnahme funktional validiert werden. Kövari verfolgt den Ansatz einer Hardware-in-the-Loop Simulationskonfiguration, in der die Simulationsumgebung die virtuelle Förderstrecke abbildet und mit externen Feldgeräten verknüpft ist.

Im ersten Schritt der Integration der virtuellen Inbetriebnahme soll die bereits existierende Parametrisierung des Applikations-Systembaukastens in die virtuelle Inbetriebnahme überführt werden und auch dort zur Parameterfestlegung der Fördersysteme zur Verfügung stehen. Im Wesentlichen werden hierzu zunächst in der administrativen Parametrisierung die Feldgeräte der Förderanlagen festgelegt und in einen Simulationsmodus überführt. Daran anknüpfend wird das Anlagensimulationsmodell erstellt, wobei das Zurückgreifen auf die, bereits im Systembaukasten existierende, Anlagenkonfigurationsdatei zur automatisierten Visualisierung des Streckenverlaufs in der Simulationsumgebung führt. Den Kern der automatisierten Visualisierung bildet eine Objekttabelle, in der ein Algorithmus dazu genutzt wird, aus einer bestehenden Querschnittsfläche des Streckenverlaufs segmentartige Extrusionen auszuführen, die im Ergebnis eine dreidimensionale Visualisierung der Förderstrecke ergeben (Kövari, 2011, S. 86-88). Die Förderstrecke wird im Anschluss in Abschnitte gegliedert, in denen Parameter, wie beispielsweise die Fördergeschwindigkeit, festgelegt werden. Dadurch können die Funktionen und Parameter in der nachgelagerten Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme segmentweise validiert werden. Dieses Vorgehen wurde in mehreren Projekten nach Angaben von Kövari erfolgreich validiert.

Bewertung der Dissertation von Kövari in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Kövari fokussiert die Einbindung der virtuellen Inbetriebnahme als Dienstleistung in ein übergeordnetes Baukastensystem. Der Autor konzentriert sich dabei auf Fördereinrichtungen, ohne jedoch dabei weitergehende methodische Vorgehensweisen für die in dieser Arbeit definierten Modellbildungsschritte vor der virtuellen Inbetriebnahme zu verdeutlichen.

Wirtschaftliche Erstellung von Emulationsmodellen für die Virtuelle Inbetriebnahme (Meyer, 2014) - Volkswagen AG.

Meyer stellt ein Rahmenwerk vor, das eine erhöhte Wirtschaftlichkeit während der Emulationsmodellerstellung erreichen soll und im Wesentlichen aus methodischen Konzepten zur Reduzierung der Arbeitsumfänge während der Modellgenerierung besteht (Meyer, 2014, S. 71). Nach Meyer ist das auch ein Grund, weshalb die Modellerstellung der Emulation eines besonderen Zeitaufwands bedarf, den es durch methodische Konzepte zu reduzieren gilt.

Das Rahmenwerk selbst bildet ein erstes methodisches Konzept und dient als Grundlage für darauffolgende Methoden der Arbeit. Innerhalb des modular aufgebauten Rahmenwerks sollen häufig wiederkehrende Tätigkeiten und projektspezifische Anpassungen während der Emulationsmodellerstellung durch Konfigurationsmöglichkeiten adressiert werden (Meyer, 2014, S. 103). Auf das Rahmenwerk folgen weitere Methoden beispielsweise zur teilautomatisierten Überführung eines Simulationsmodells in ein Emulationsmodell zur phasenübergreifenden Verwendung während des Lebenszyklusses des Produktionssystems. Den Kern dieser Transformation bildet ein Konfigurationsassistent, der bestehende Simulationsmodelle auf emulationsrelevante Objekte anhand definierter Attribute durchsucht und für die Emulation nutzbar gestaltet (Meyer, 2014, S. 89-90). Eine weitere Methode bezieht sich auf den Ansatz einer integrierten virtuellen Inbetriebnahme (IVIBN). Der Integrationsansatz sieht eine Berücksichtigung der Materialflusssimulation und Anlagenmodellsimulation innerhalb eines Simulationsvorhabens vor. Dieses Konzept validiert Meyer anhand einer Lackiererei der Automobilindustrie in Wolfsburg und bewertet das Vorgehen vor dem Hintergrund des Objekttransfers zwischen Anlagen- und Materialflusssimulation als erfolgreich (Meyer, 2014, S. 148-154).

Bewertung der Dissertation von Meyer in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Meyer liefert in seiner Arbeit eine umfassende Anzahl an methodischen Ansätzen zur Reduzierung des Arbeitsaufwandes während der Emulationsmodellgenerierung. Während sich Meyer auf die Erarbeitung eines Rahmenwerks zur Reduzierung des Emulationsaufwandes und der kombinierten Betrachtung der Anlagen- und Materialflusssimulation konzentriert, fokussiert sich diese Arbeit ausschließlich auf die Anlagensimulation ohne weitergehende Ansätze für eine Anwendung im Rahmen einer Emulation.

Weitere aktuelle und zurückliegende Ansätze mit industriellem Hintergrund

Ansätze der Chalmers Universität, Schweden in Zusammenarbeit mit der Volvo-Car-Group

Die Chalmers University of Technology in Göteborg, Schweden, arbeitet in der Thematik der virtuellen Inbetriebnahme an einem breiten Themenbereich und veröffentlichte hierzu teilweise aktuelle sowie zurückliegende Arbeiten in Zusammenarbeit mit der Volvo Car Corporation, wovon drei Ansätze nachfolgend vorgestellt werden.

Ansatz von Albo & Falkman, 2020

In der Arbeit von (*Albo & Falkman, 2020*) wird ein Rahmenwerk vorgestellt, welches eine Umsetzung der virtuellen Inbetriebnahme in fünf Klassifizierungsebenen gliedert und deren Einsatz für Green- und Brownfield-Anwendungen diskutiert. Mit zunehmender Detaillierung und Arbeitsaufwand beschreiben die Ebenen, ausgehend von einer Emulation des Steuerungscodes in Ebene eins, über die Berücksichtigung von Signalinteraktionen und Sensoreinbindung in den Ebenen zwei und drei, hin zu der vollständigen Kinematisierung der betrachteten Ressourcen und dem Aufbau eines Systemverbunds in den Ebenen vier und fünf, die Modellumfänge der Ebenen. Den Modellumfängen ordnen die Autoren Funktionalitätsklassen zu, in denen die Möglichkeiten zur Verifizierung – also beispielsweise als Blackbox Prinzip auf Ebene eins oder eine Flusssimulation zwischen den Systemen auf Ebene fünf – festgehalten werden. Die Klassifizierungsebenen und die Funktionalitätsklassen ordnen die Autoren in ein Diagramm, bestehend aus vier Bereichen, zur Betrachtung der geschätzten Implementierungskosten gegenüber der Projektlebensdauer. Die Autoren konstatieren, dass sich die Nutzung hoher Klassifizierungsebenen vor allem für Greenfield-Anwendungen, auch aufgrund ihrer höheren Lebensdauer, als wirtschaftlich vertretbar erweisen, wohingegen für Brownfield-Anwendungen die niedrigeren Klassifizierungsebenen zu wählen sind.

Ansatz von Ganesan & Dharmaraj, 2019

Die Autoren verfolgen die Zielstellung von Standardisierungsmaßnahmen während der Vorbereitung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme. Gegenstand der Untersuchung ist eine Punktschweißzelle, bestehend aus fünf Industrierobotern des Herstellers ABB, die innerhalb einer Station Bodenbleche fügen und Teil einer Produktionslinie für den Karossierebau

im Volvo-Werk-Torslanda in Schweden sind. Die von den Autoren vorgeschlagenen Standardisierungen umfassen, zum einen, die Übertragung der Ressourcenbenennung ausgehend von der Erzeugung der Signalnamen der verwendeten speicherprogrammierbaren Steuerungen in den Modellierungsbaum der Softwareumgebung der virtuellen Inbetriebnahme. Zum anderen schlagen die Autoren eine Prozedur zum Zurücksetzen sicherheitsrelevanter Elemente während der virtuellen Inbetriebnahme vor und erarbeiten einen Lösungskatalog, der Probleme, die während der Arbeit entstanden, adressiert und Vorschläge zur Problembeseitigung liefert. Darüber hinaus empfehlen die Autoren der Volvo Car Group, bei der, nach Einschätzung der Autoren, ausschließlich Siemens Produkte zum Einsatz kommen, als Ergänzung, eine Verwendung des in früheren Arbeiten entwickelten Sequence-Planners, eine Softwareapplikation, die als Modellierungs- und Analysewerkzeug zur Ablaufplanung von Prozessen dient. Zusätzlich untersuchen die Autoren auch die Möglichkeit der Einbindung weiterer Software, beispielsweise WinMod der Firma Mewes und Partner, die zwar eine erweiterte Funktionalität während der virtuellen Inbetriebnahme bietet, jedoch für die Volvo-Car-Group aus Lizenzkostengründen nicht weiter als ergänzende Softwareumgebung berücksichtigt wird.

Ansatz von Heidari & Salamon, 2012

In der Arbeit von (*Heidari & Salamon, 2012*) wird die Vorbereitung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme anhand einer bestehenden Rohkarosseriebauzelle bei der Volvo-Car-Corporation mittels DELMIA V6, einer Softwareanwendung des Unternehmens Dassault Systemes, diskutiert. Das in der Arbeit geschilderte Vorgehen betrachtet die zur Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme notwendigen Schritte, beginnend mit der Erstellung des Geometriemodells, der Roboterprogrammintegration und der SPS-Programmerstellung, vor dem Hintergrund einer heterogenen Datenlandschaft. Die Autoren diskutieren die Herausforderungen bei der Überführung bestehender Datenformate in ein neues – also ein in DELMIA V6 anwendbares – Dateiformat und weisen beispielsweise auf unterschiedliche Philosophien in der Datenablage zwischen verschiedenen Softwarewerkzeugen, wie Siemens Process-Simulate und Dassault Systems DELMIA V6, hin. Darauf aufbauend unterbreiten die Autoren weitere Vorgehensweisen, wie trotz unterschiedlicher Systemphilosophien, eine Überführung in die Softwarelandschaft DELMIA V6 gelingen kann.

Ansatz von Selzer, 2018 – Systemzulieferer Automotive

Im Zentrum der Arbeit von (*Selzer, 2018*) steht die Vorbereitung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme zur geometrischen und funktionalen Validierung einer Schlichte- und Montagezelle aus der Perspektive eines Systemzulieferers für einen Großkonzern im deutschen Automotive-Sektor. Die betrachteten Zellen fertigen zunächst die dreiteiligen Kernpakete, die im zweiten Teil des betrachteten Gesamtprozesses montiert und eine Negativform zur Herstellung von Grauguss Motorblöcken ergeben. Selzer diskutiert im weiteren Verlauf die Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme, entsprechend dem Vorgehen, das auch in dieser Arbeit in *Kapitel 2.3.3* geschildert wurde. Als Erweiterung der Zielstellung stellt Selzer einen Ansatz zur Produktnachverfolgung innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme vor. In der konkreten Umsetzung übernimmt ein Leitrechner, der in der Arbeit von Selzer durch ein Human-Machine-Interface (HMI) dargestellt wird, die Generierung einer Zeichenkombination, bestehend aus einer Buchstaben-Zahlenfolge. Diese Zeichenkombination wird in einem Array hinterlegt und innerhalb des Steuerungsbausteins durch eine Blockmove-Anweisung, die an die Anlagentaktung gekoppelt ist, in einen neuen Speicherbereich geschoben. Im Resultat der Arbeit konstatiert Selzer die erfolgreiche Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme mit der Möglichkeit der Produktverfolgung.

Ansätze von Süß et al., 2015; Süß et al., 2016a und Süß et al., 2016b – Daimler Aktiengesellschaft

In (*Süß et al., 2015*) wird eine stärkere Einbindung der Komponentenhersteller in Anlagenentwicklungsprozesse diskutiert, wobei, zum einen, die herstellerseitige Verhaltensmodellierung (Manufacturer Behavior Models) und, zum anderen, die Zugänglichkeit dieser Modelle für Anwender der virtuellen Inbetriebnahme im Zentrum der Betrachtung stehen. Die Autoren sehen eine Herausforderung darin, dass der Komponentenhersteller die Komponentenverhaltensmodelle in einer solchen verallgemeinerten Form zur Verfügung stellen müsste, dass sie für eine breite Anwenderschaft zunächst durch ein standardisiertes Austauschverfahren verwertbar sind und, daran anknüpfend, durch die individuellen Anforderungen getrieben, eine anwenderspezifische Anpassung (User Behavior Models) erlauben. Hierzu erarbeiten die Autoren ein schematisches Konzept, welches einen Co-Simulationsansatz verfolgt und als Master-Slave Prinzip mehrere Subsystemmodelle, über einen Co-Simulationsmaster zu einer Gesamtsimulation der Komponentenverhaltensweisen,

entstehen lässt. Im weiteren Verlauf der Arbeit diskutieren die Autoren die Anforderungen an eine solche Gesamtsystemsimulation, die sie mit der Echtzeitfähigkeit in der Kommunikation zwischen den beteiligten Simulationswerkzeugen, der Sicherstellung der Skalierbarkeit der Gesamtsystemsimulation sowie einer Mensch-Maschine-Schnittstelle konkretisieren.

Die in (*Süß et al., 2015*) erlangten Erkenntnisse, werden in (*Süß et al., 2016a*) dazu verwendet, einen Ansatz vorzustellen, der nun die Standardisierung der Schnittstellen zwischen den Verhaltensmodellen adressiert. In der Umsetzung besteht, den Autoren zufolge, zunächst die Notwendigkeit, die vorhandenen Verhaltensmodellarten zu identifizieren, wobei in den Unternehmen häufig verwendete Komponenten identifiziert und eine Methode für deren einheitliche Klassifizierung erarbeitet werden sollen. Zur Identifizierung der Komponenten wählen die Autoren das eCl@ss-System, welches einen Produktspezifikationsstandard für mechatronische Systeme zur Verfügung stellt und gemeinsam mit Integra, einem in der Daimler AG eingesetzten Unternehmensstandard in der Automatisierung, eine Klassifizierung der Komponenten der Produktionsanlagen erlaubt. Zu jeder Komponentenklasse definieren die Autoren Schnittstellen, die es jeweils zur steuernden speicherprogrammierbaren Steuerung und zum Visualisierungswerkzeug zu berücksichtigen und aufzuteilen gilt. So ergeben sich für ein Verhaltensmodell die Bereiche der Parameter, die SPS-Schnittstelle, die Visualisierungsschnittstelle und die Schnittstelle zur Einbindung der Physikumgebung. Den vorgestellten Ansatz und seine industrielle Anwendbarkeit sehen die Autoren durch die erfolgreiche Validierung anhand zweier Fälle als belegt.

In (*Süß et al., 2016b*) wird untersucht, wie Verhaltensmodelle in die bestehenden Prozesse der Vorbereitung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme, auch durch Anpassung der verwendeten Werkzeugkette, integriert werden können. Die Autoren stellen heraus, dass eine gesamtheitliche Betrachtung der Modelle, einschließlich der geeigneten Simulation innerhalb eines Frameworks, Voraussetzung für eine Integration, also einen erfolgreichen Informationsaustausch zwischen den Verhaltensmodellen, den Laufzeitsystemen der Steuerungsprogramme und den Testwerkzeugen, ist. In der Umsetzung sieht die Lösung für einen erfolgreichen Informationsaustausch den Einsatz von AutomationML, ein Datenaustauschformat, vor. Im Konkreten bedeutet dies, die Möglichkeit zum Austausch von Variablen zwischen dem verwendeten Steuerungsprogramm und den Verhaltensmodellen. Die Autoren nutzen zur Veranschaulichung und Validierung des Gesamtansatzes einen

Industrieroboter mit Greifwerkzeug. Sie verdeutlichen die Verteilung der Simulation der Verhaltensmodelle des Greifers und des Industrieroboters im vorgestellten Co-Simulationsframework, wobei Möglichkeiten geschaffen werden, sodass die Simulationsbestandteile über einheitliche Verbindungen, beispielsweise Shared-Memory, miteinander kommunizieren können. Im Anschluss an einen Leistungstest der Co-Simulation konstatieren die Autoren zwar die qualitative Plausibilität der Ergebnisse, führen jedoch an, dass eine Bewertung in quantitativer Hinsicht weiterer Validierungen bedarf.

Ansätze nach Metzner et al., 2019a und Metzner et al., 2019b – Siemens Aktiengesellschaft

In (*Metzner, et al., 2019a*) wird untersucht, wie der Faktor Mensch, vor dem Hintergrund eines steigenden Bedarfs an hybriden Systemen – also Systeme, die manuelle und automatisierte Tätigkeiten kombinieren – in die Umgebung der virtuellen Inbetriebnahme integriert werden kann. Dabei ist in der technischen Umsetzung ein ähnlicher Ansatz wie in (*Rueckert et al., 2020*) zu erkennen, indem die Bewegungen des Menschen über eine aktive Stereokamera und über ein Motion Controller Ansatz erfasst und in die physikbasierte Simulationsumgebung, eingebunden werden kann. Die Autoren führen an, dass der Fokus auf die Integration der Hände eines Menschen in die Simulationsumgebung gelegt wird und auf der Erstellung von virtuellen Handmodellen basiert. Das System wurde an 20 Anwendern, von denen ein Großteil über keine Erfahrungen im Umgang mit einer virtuellen Inbetriebnahme verfügt, getestet. Die Auswertung der Studie ergab eine verbesserte Bedienbarkeit, vor allem für Nicht-Experten.

In (*Metzner et al., 2019b*) wird ein Ansatz zur simulationsgestützten Handhabung von ungeordneten Teilen, auch Bin-Picking genannt, vorgestellt. Die Autoren fokussieren den Ablauf der Objekterkennung und der Posenschätzung in industrienahen Umgebungsbedingungen. Um die unsortierten bzw. ungeordneten Teile in einem Behälter zunächst maschinell zu identifizieren, verwenden die Autoren, aufgrund der Echtzeitanforderung, den Ansatz des Live Renderings. Im weiteren Verlauf der Arbeit beschreiben die Autoren, wie die optische Erkennung der ungeordneten Teile in einem Behälter durch Punktewolken und Nachbearbeitungsalgorithmen realisiert wurde, wobei die Beleuchtung entscheidend zur Ergebnisqualität beiträgt. Zwar führen die Autoren eine umfangreiche Betrachtung zur Objekterkennung mit nachvollziehbaren Ergebnissen durch, jedoch bleibt die Überführung der Ergebnisse in die Bahnplanung des objektgreifenden Roboters nur im Theoretischen erläutert.

3.2.3 Zusammenfassung des Standes der Technik der virtuellen Inbetriebnahme

Das Kapitel bietet einen Einblick in die vielseitigen Einsatzmöglichkeiten der virtuellen Inbetriebnahme. Gleichzeitig wird die Angebotsbreite, der am Markt verfügbaren und in den betrachteten Arbeiten verwendeten Software-Werkzeuge für eine virtuellen Inbetriebnahme deutlich (Wünsch, 2008, S. 36-69; Kiefer, 2007, S. 44-49; Kövari, 2011, S. 73-74; Selzer, 2018).

Während in den Arbeiten von (Scheifele, 2019, S. 114; Kufner, 2011, S. 146) die Simulationssoftware ISG-Virtuos der *Industrielle-Steuerungstechnik-GmbH* verwendet wird, nutzen (Damrath, 2018, S. 138; Heidari & Salamon, 2012; Kiefer, 2007, S. 109) die Simulationsanwendung DELMIA der Firma Dassault Systemes (*ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, o. D.; Dassault Systèmes, o. D.*). Zur Verhaltensmodellierung setzen (Spitzweg, 2009, S. 102-104; Hoffmann, 2016, S. 178) WinMOD der Mewes & Partner GmbH ein (*Mewes & Partner GmbH, o. D.*). Im Anschluss an die Verhaltensmodellierung nutzt (Spitzweg, 2009) die eigens aufgebaute Simulationsumgebung *Virtual Engineering Environment Extended* (Ve3), wohingegen (Hoffmann, 2016, S. 178) CIROS, ein Simulationswerkzeug der *Festo Didactic GmbH & Co. KG* verwendet (*Festo Didactic SE, o. D.*). Innerhalb der Arbeiten von (Roman et al., 2018; Albo & Falkmann, 2020; Ganesan & Dharmaraj, 2019; Selzer, 2018) bildet das Simulationswerkzeug *Tecnomatix-Process-Simulate* der *Siemens AG* die Softwarebasis (*Siemens AG, o. D.*). Auch aus Sicht der Automatisierung existiert eine vielfältige Toollandschaft. In den vorgestellten Arbeiten werden somit beispielsweise das *Totally Integrated Automation Portal* (TIA-Portal) der *Siemens AG*, der *GX IEC Developer* der *Mitsubishi Electric Europe B.V.* oder *CODESYS* der *CODESYS GmbH* zur Erarbeitung der Steuerungsprogramme der zukünftig geplanten Produktionssysteme verwendet (Hoffmann, 2016, S. 100; Selzer, 2018; Roman et al., 2018; Ganesan & Dharmaraj, 2019; Heidari & Salamon, 2012; Mortensen et al., 2017; Mortensen & Madsen, 2018).

Zusammenfassend werden die vorgestellten Arbeiten vor dem Hintergrund verschiedener, teilweise in den Grundlagen dieser Arbeit vorgestellter, Kriterien eingeordnet. Die Kriterien sowie ihre Ausprägungen werden nachfolgend vorgestellt. Die Einordnung der Arbeiten und Ansätze ist in *Tabelle 3.2-1* umgesetzt.

Kriterium 1 – Simulationskonfiguration: Die Simulationskonfiguration gibt einen Aufschluss über die verwendeten Software-Hardware Konstellationen der, zur Durchführung der virtuellen

Inbetriebnahme, verwendeten Simulationsumgebung. Die Ausprägungen können den Ansatz von Model-In-the-Loop (MIL), Software-In-the-Loop (SIL) oder Hardware-In-the-Loop (HIL) verfolgen, aber auch teilweise über die in dieser Arbeit vorgestellten Konfigurationen hinausgehen.

Kriterium 2 – Anwendungsfeld: Das Anwendungsfeld identifiziert den Unternehmensbereich, in dem die virtuelle Inbetriebnahme eingesetzt wird. Typische Ausprägungen können Produktions- und Fertigungs- oder Montageprozesse sein, aber auch Anwendungen im Bereich der Logistik oder der Handhabung von Produkten.

Kriterium 3 – Ansatz der Arbeit: Der Ansatz der Arbeit soll aus der Perspektive der virtuellen Inbetriebnahme den jeweiligen Kontext der Arbeit identifizieren. Der Kontext der Arbeit könnte die Integration der virtuellen Inbetriebnahme in andere Prozesse, Aspekte der Modellgenerierung oder einen anwendungsspezifischen Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme adressieren, ist jedoch nicht auf diese Beispiele begrenzt und soll lediglich den Handlungsspielraum grob skizzieren.

Kriterium 4 – Unternehmensebenen: Das Kriterium Unternehmensebenen identifiziert, auf welcher Ebene die virtuelle Inbetriebnahme in der jeweiligen Arbeit eingesetzt wird. Viele Arbeiten verwenden für diese Einordnung die Automatisierungspyramide, wobei sich die Anzahl der Ebenen innerhalb der Automatisierungspyramide zwischen den vorgestellten Arbeiten stark unterscheidet. Für die Einordnung der vorgestellten Arbeiten und Ansätze in diesem Kapitel wird die Hierarchie der Automatisierungspyramide in die Prozessebene (E1), die Feldebene (E2), die Steuerungsebene (E3), die Prozessleitebene (E4), die Betriebsleitebene (E5), die Fabrikebene (E6) und die Unternehmensebene (E7) gegliedert.

Kriterium 5 – Komplexitätsausprägung: Die Komplexitätsausprägung identifiziert die durch den Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme adressierte Komplexität. Diese Komplexität kann sich auf den betrachteten Prozess, die eingesetzten Ressourcen oder das zu erarbeitende Produkt beziehen. Die Einordnung der Komplexitätsausprägung ist nicht auf den Prozess der virtuellen Inbetriebnahme selbst bezogen, sondern auf den, durch die virtuelle Inbetriebnahme, zu validierenden Sachverhalts. Für alle Arbeiten dieses Kapitels ist anzumerken, dass der Aspekt cyber-physischer Produktionssysteme nicht, oder zumindest nicht explizit, adressiert wird.

Tabelle 3.2-1. Stand der virtuellen Inbetriebnahme in Forschung und Industrie.

Arbeiten und Ansätze	Simulationskonfiguration	Anwendungsfeld	Ansatz der Arbeit	Ebenen	Ausprägung der Komplexität
Brökelmann, 2015	n. b.	Logistik	Integration der VIBN	E2-E4	n. b.
Scheifele, 2019	CO-SIM.; HIL	Logistik	Simulationsplattform	n. b.	n. b.
Puntel-Schmidt, 2017	HIL	Logistik	autom. Modellgener.	E3	n. b.
Lacour, 2011	SIL; HIL	Logistik	Physikbasierte VIBN	E3	Anlage
Kufner, 2011	HIL	Montage	Automat. Modellerst.	E2	Anlage
Wünsch 2008	HIL	Produktion	Wirtschaftl. VIBN	E2-E4	Anlage
Spitzweg, 2009	HIL	Logistik	Physikbasierte VIBN	E2	Produkt
Hoffmann, 2016	HIL	Logistik	Red. Modellgen.aufwand	E1-E4	n. b.
Mortensen et al., 2017	n. b.	Fertigung	VIBN von RMS	n. b.	Prozess
Mortensen & Madsen, 2018	HIL	Fertigung	VIBN von RMS	E5	Prozess
Mortensen & Madsen, 2019	n. b.	Logistik	VIBN von RMS	n. b.	Prozess
Roman et al., 2018	SIL	Produktion	VIBN Qualitymanagm.	E4	Prozess
Schamp et al., 2018	n. b.	Produktion	VIBN Studie	E2	n. b.
Schamp et al., 2019	n. b.	Produktion	Effizientere Modellgen.	E2	Prozess
Rueckert et al., 2020	HIL	Produktion	VIBN Mensch-Robot-kollab	n. b.	Anlagen
Kiefer, 2007	HIL	Produktion	VIBN Prozessoptim.	E3	n. b.
Damrath, 2018	n. b.	Produktion	Energieeffizienzmodellierung	E2	n. b.
Kővári, 2011	HIL	Logistik	VIBN Integration	E2-E3	Anlagen
Meyer 2014	HIL	Logistik	Wirtschaftl. Integrierte. VIBN	E2-E3	n. b.
Albo & Falkman, 2020	n. b.	Produktion	Wirtschaftl. VIBN	n. b.	Anlagen
Santhosh & Visveswaran, 2019	SIL	Produktion	Standardisierung	E2-E4	Prozess
Heidari & Salamon, 2012	HIL	Produktion	Modellgenierierung	E2-E4	n. b.
Selzer, 2018	SIL	Logistik	VIBN mit Nachverfolgung	E2-E4	Anlagen
Süß et al., 2015	CO-SIM.	n. b.	Standardisierung	E2	n. b.
Süß et al., 2016a	CO-SIM.	n. b.	Standardisierung	E2	n. b.
Süß et al., 2016b	CO-SIM.	n. b.	Standardisierung	E2	n. b.
Metzner et al., 2019a	HIL	Handhabung	Menscheinbindung in VIBN mit Physik	E2-E4	Prozess
Metzner et al., 2019b	SIL; HIL	Handhabung	VIBN mit optischer Erkennung	E2-E4	Prozess

3.3 Cyber-physische Produktionssysteme

Dieses Kapitel stellt aktuelle sowie zurückliegende Arbeiten und Forschungsansätze vor, die die inhaltliche Erarbeitung, Charakterisierung oder einen Einsatz von cyber-physischen Produktionssystemen adressieren. Es werden Arbeiten aus dem Bereich der Forschung (*Kapitel 3.3.1*) und Industrie (*Kapitel 3.3.2*) vorgestellt, bevor die gewonnenen Erkenntnisse in *Kapitel 3.3.3* zusammengefasst werden.

3.3.1 Stand der Forschung

Steigerung der Rekonfigurationsfähigkeit von Montageanlagen durch Cyber-physische Feldgeräte (Hammerstingl, 2020)

Hammerstingl untersucht, wie der Einsatz von cyber-physischen Automatisierungskomponenten in der Montage eine erhöhte Rekonfigurationsfähigkeit der Produktionssysteme begünstigen kann (*Hammerstingl, 2020, S.6*). Unter cyber-physischen Systemen versteht der Autor Systeme, die sich selbst beschreiben und eigenständig an sich ändernde Anforderungen und Aufgaben anpassen können (*Hammerstingl, 2020, S. 34-35, 72*).

Die Lösung sieht ein Vorgehen in drei Teilschritten vor, die anhand einer modularen Montagestation validiert werden. Im ersten Schritt wird ein Konzept erarbeitet, das eine automatisierte Vernetzung der Feldgeräte, einschließlich der Bereitstellung eines digitalen Zwilling, vorsieht. Hierzu schlägt der Autor zunächst eine Geräteklassifizierung vor und weist darauf hin, dass zwar als smart eingeordnete Komponenten bereits über technische Voraussetzungen zur automatisierten Vernetzung mit anderen smarten Komponenten verfügen, jedoch zur Berücksichtigung nicht-smarter Komponenten, die den Großteil der betrachteten Feldgeräte ausmachen, eine Software-Erweiterung, einzusetzen ist. Diese Software-Erweiterung wird von den Autoren als Plug&Produce-Konzept vorgestellt und beinhaltet die, zur automatischen Vernetzung, benötigten Voraussetzungen. Im zweiten Schritt werden die Untergruppen der Montage, also Fügen, Handhaben, Kontrollieren, Justieren und Sonderoperationen, als lösungsneutral beschriebene Fähigkeiten der Montageprozesse definiert und durch prozess- und produktbezogene Parameter spezifiziert. Die im Zentrum der Betrachtung stehenden Fähigkeiten dienen in diesem Konzept also, in Anlehnung an das PPRS-Modell (Produkt-Prozess-Ressourcen-Skill-Modell) von (*Pfrommer et al., 2013*), als eine Art

Bindesglied zwischen den Produkten und Prozessen, und die Parameter konkretisieren diese Beziehung. Die Verkettung von Montagefähigkeiten wird im dritten Schritt auch verwendet, um eine für den Montageprozess geeignete Ressourcenauswahl zu treffen. Dabei können Ressourcenkombinationen Fähigkeitskombinationen erfüllen. Die Konzepte werden anhand eines Montagedemonstrators validiert und als wirtschaftlich potenzialreich bewertet.

Bewertung der Dissertation von Hammerstingl in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Hammerstingl beschreibt die Eigenschaften cyber-physischer Systeme im Umfeld der Montage und auf Feldebene als sich selbst beschreibend und selbstanpassend. Hammerstingl liefert neben Konzepten zur Vorgehensweise während einer Rekonfiguration auch einen Ansatz, wie die betrachteten Systeme nach Hammertsingl's Vorstellungen als cyber-physische Feldgeräte konkretisiert werden können. Ein Konzept, wie cyber-physische Produktionssysteme durch simulationsbasierte Prozesse, zukünftig existierender Anlagen, erarbeitet werden können, bleibt, auch aufgrund des differenzierten Fokus in der formulierten Zielstellung, offen.

Echtzeitfähige Softwareagenten zur Realisierung cyber-physischer Produktionssysteme (Theiss, 2015)

Theiss verfolgt die Erarbeitung eines Agentensystems mit dem besonderen Fokus auf die Echtzeitfähigkeit im gesamten betrachteten System. Der Autor führt an, dass ein Verbund von mehreren untereinander kommunizierenden Agentensystemen, die verteilte Aufgaben in einer verteilten Architektur übernehmen, der Strukturvorstellung von cyber-physischen Produktionssystemen ähnlich sind (Theiss, 2015, S. 46). Eine konkrete Definition cyber-physischer Produktionssysteme geht zwar nicht eindeutig hervor, jedoch beschreibt der Autor cyber-physische Produktionssysteme auch als einen Wandel ausgehend von einer heterogenen, durch technologische Diskontinuitäten geprägte, Kommunikationsarchitektur hin zur durchgängigen Vernetzung verteilter Systembestandteile mit positiven Auswirkungen auf die Flexibilität, Robustheit und Modularität der betrachteten Systemkomponenten (Theiss, 2015, S. 35-38, 78).

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird zunächst dargelegt, wie die Agentensysteme isoliert auf einem Rechnerknoten und darauf aufbauend als verteilte Agentensysteme auf mehreren Rechnerknoten in Echtzeit, basierend auf einem Netzwerkmodell, interagieren. Im Resultat der Arbeit wird die Funktionalität der echtzeitfähigen Agentenplattform anhand eines

Automatisierungsprojekts veranschaulicht, indem beispielsweise Kennwerte von Anlagenbestandteilen zur Feststellung von Abweichungen, im Sinne einer Selbstdiagnose, miteinander verglichen werden.

Bewertung der Dissertation von Theiss in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Die Arbeit zeigt Möglichkeiten, wie die Herausforderungen der Kommunikation von verteilten Systemkomponenten und der Aspekt der dezentralen Organisation von cyber-physischen Produktionssystemen durch Agentensysteme adressiert werden kann. Zwar veranschaulicht der Autor die Funktionsweise anhand eines Automatisierungsprojekts und leitet grundsätzliche Eigenschaften cyber-physischer Produktionssysteme her, jedoch bleiben aufgrund der Schwerpunktsetzung die Beantwortung der Fragestellungen in dieser Arbeit besonders im Blick auf die simulationsgestützte Entwicklung cyber-physischer Produktionssysteme offen.

Abstraktion verteilter Produktionsmaschinen in cyber-physischen Produktionssystemen (Heisig, 2016)

Die Zielstellung in der Diplomarbeit von (Heisig, 2016) untersucht, wie ein Konzept zur Integration von Altanlagen in cyber-physische Produktionssysteme trotz fehlender Schnittstellen erarbeitet werden kann. Der Autor macht darauf aufmerksam, dass sich cyber-physische Produktionssysteme dadurch auszeichnen, dass sie Informationen aus den Daten der in der realen Welt eingesetzten sowie eingebetteten Systeme für eine virtuelle Repräsentanz beziehen können. Daran anknüpfend können sie aus der virtuellen Repräsentanz eines betrachteten Systems, Steuerungsanweisungen für eingebettete Systeme ableiten, wodurch eine Synchronisation mittels Rückkopplungsschleifen zwischen beiden Welten entsteht (Heisig, 2016, S. 16).

Im Mittelpunkt des Lösungskonzepts steht eine virtuelle Maschinenrepräsentation. Sie bildet die Schnittstelle zwischen der Altanlage mit fehlender informationstechnischer Infrastruktur und der Produktionsumgebung, in die sie integriert wird (Heisig, 2016, S. 38, 42-48). In der Umsetzung wird zum einen vorgestellt wie Einplatinencomputer, beispielsweise ein Raspberry-Pi, dazu verwendet werden können, analoge und digitale Signale verarbeiten zu können und zum anderen, wie eine Anbindung der virtuellen Maschinenrepräsentation an speicherprogrammierbare Steuerungen der moderneren Anlagenbestandteile angebunden

werden kann. Im Resultat spiegelt der Einplatinencomputer, auf dem die virtuelle Maschinenrepräsentanz realisiert ist, die Integration der Altanlagen in bestehende Produktionen wider und erlaubt neben externen Zugriffen auf die Daten der Altanlagen auch deren Kommunikation mit anderen in der betrachteten Produktion befindlichen Anlagen (*Heisig, 2016, S. 72*).

Bewertung der Dissertation von Heisig in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Heisig legt dar, wie Anlagen, die über eine eingeschränkte informationstechnische Infrastruktur verfügen, in ein dezentrales Netzwerk eines cyber-physischen Produktionssystems eingebunden werden können. Zwar ist der Fokus der Arbeit auf Fertigungsanlagen gesetzt, jedoch liegt der eindeutige Schwerpunkt der Arbeit auf der Informations- und Kommunikationstechnologie und nicht in der simulationsgestützten Planung, entsprechend der Zielstellung in dieser Arbeit.

Weitere aktuelle und zurückliegende Forschungsarbeiten und -ansätze

Ansatz nach Berger et al., 2019

Im Mittelpunkt der Untersuchung von (*Berger et al., 2019*) stehen die Auswirkungen von intern und extern verursachten Veränderungen im Produktionsumfeld auf die Produktionsplanung und ereignisbasierte Produktionssteuerung von cyber-physischen Produktionssystemen. Die Autoren sehen cyber-physische Produktionen durch Mobilität, Wandlungsfähigkeit einzelner cyber-physischer Systeme sowie ihrer dezentralen Organisation gekennzeichnet. Sie legen die Notwendigkeit dar, vor allem produktionsinterne unerwartete Veränderungen, beispielsweise Maschinenausfälle, schnellstmöglich zu identifizieren und ihnen entgegenzusteuern. Hierzu schlagen die Autoren ein, von Lödding vorgestelltes, und für die Berücksichtigung cyber-physischer Produktionssysteme, adaptiertes Modell der Produktionsplanung und -steuerung vor (*Lödding, 2016, S. 8*). Das adaptierte Modell berücksichtigt die Wandlungsfähigkeit und die Dezentralität, indem es für jede cyber-physische Ressource eine Bestands-, Rückstands- und Ablaufsteuerung vorsieht. Um die Zustände der Ressourcen zu ermitteln, erarbeiten die Autoren ein Vorgehen zur Bestimmung einer ressourcenübergreifenden Abfrage der Fertigungsparameter. Das Vorgehen wird innerhalb einer Fabriksimulationssoftware als erfolgreich validiert und eine Überprüfung des Vorgehens in einer realen Testumgebung angestrebt.

Ansätze nach Francalanza et al., 2017 und Francalanza et al., 2018

In der Arbeit von (*Francalanza et al., 2017*) wird ein Rahmenwerk vorgestellt, welches Produktionsentwickler in der Entwurfsphase von cyber-physischen Produktionssystemen durch einen wissensorientierten Ansatz unterstützt. Im Wesentlichen unterstützt der wissensorientierte Ansatz den Anwender dabei, schon während der Entwurfsphase Entscheidungen für das Systemdesign treffen zu können, die auch die Konsequenzen dieser Entscheidung auf nachgelagerte Phasen des Produktionslebenszyklusses, beispielsweise den Betrieb oder die Wartung der Produktion, berücksichtigen. Die Notwendigkeit des Ansatzes ist dadurch gegeben, dass Anwender mit der zunehmenden Menge an Informationen, auch im Zusammenhang mit cyber-physischen Produktionssystemen, die sich, laut den Autoren, durch eine besondere Anpassungs-, Netzwerk- und Leistungsfähigkeit auszeichnen, konfrontiert sehen. Das Rahmenwerk verdeutlicht die Vorgehensweise während der Entwurfsphase, und zeigt, wie wissensbezogene Aspekte in die Entscheidungen während der operativen Tätigkeiten und der Modellierung einfließen. Das Konzept wird innerhalb einer Software-Anwendung in die Realität umgesetzt und soll als Werkzeug der Digitalen Fabrik zukünftig auch auf Prozess- und Produktentwurfsprozesse angewendet werden.

In (*Francalanza et al., 2018*) wird ein systematischer Entwurfsansatz für modulare cyber-physische Produktionssysteme vorgestellt, der auf der Modular Function-Deployment-Methode (MFD) von Erixon basiert (*Erixon, 1998, S. 66*). Die Methode identifiziert zunächst die Modultreiber und gruppiert auf dieser Basis anschließend die betrachteten Komponenten zu Modulen. In der Umsetzung der Methode von Francalanza et al., 2018 werden im ersten Schritt die Systemanforderungen mittels QFD-Analyse identifiziert. Die Anforderungen werden im zweiten Schritt als Funktionen betrachtet und in technische Lösungen überführt. Die Schritte drei bis fünf sehen die Bildung, Evaluierung und Verbesserung der Module vor, wobei im dritten Schritt vorher definierte Modultreiber, beispielsweise die Fabriklebenszeit, den zu gruppierenden Systemelementen gegenübergestellt und auf ihre Abhängigkeiten hin bewertet werden. In der Realisierung wird die Modulbildung vor allem dadurch deutlich, dass eine strikte Trennung zwischen der virtuellen Umgebung, also der Cloud, und den physischen Objekten, beispielsweise den Maschinen und speicherprogrammierbaren Steuerungen, vorgenommen wurde.

Ansatz nach Kolberg et al., 2016

Kolberg untersucht, wie ein Framework zur Erarbeitung von cyber-physischen Systemen und deren Integration in Produktionsumgebungen ausgestaltet sein muss, damit über bestehende Ansätze hinaus eine abgestimmte Entwicklungsprozedur realisiert und Interaktionen zwischen mehreren Fabrikentitäten berücksichtigt werden können. Das Framework besteht aus einer Referenzarchitektur, einer Methodik und einem Vorgehensmodell. Die Referenzarchitektur strukturiert die Komponenten einer betrachteten cyber-physische Produktion in eine Produkt-, eine Produktions- oder Infrastruktur-Zugehörigkeit und klassifiziert die Komponenten, aus organisatorischer, funktionaler oder steuerungstechnischer Perspektive. Mit der Methodik möchten die Autoren Werkzeuge zur Beschreibung der Komponentenklassen empfehlen und schlagen darüber hinaus eine Erweiterung einer Modellierungssprache zur detaillierteren Prozessdarstellung vor. Um Anwender des Frameworks bei der Nutzung zu unterstützen, enthält das Framework ein Vorgehensmodell, welches die Inhalte der Entwurfsphase konkretisiert. Im Resultat der Arbeit bewerten die Autoren diese Möglichkeit der Nutzung des Frameworks als erfolgreich, wobei uneindeutig ist, ob das betrachtete Produktionssystem, den Autoren nach, als cyber-physisches oder konventionelles Produktionssystem eingeordnet wird.

Ansatz nach Michniewicz & Reinhart, 2014

Die Arbeit von (*Michniewicz & Reinhart, 2014*) untersucht die Möglichkeiten einer automatisierten Roboterzellkonfiguration, -programmierung und -optimierung, ausgehend von einer virtuellen Produktrepräsentanz. Diese Produkte und die Bestandteile der Roboterzelle werden von den Autoren als intelligent verarbeitende, miteinander kommunizierende und interagierende cyber-physische Systeme definiert. Im weiteren Verlauf werden die Roboterzelle als Cyber-Physical-Robot-Cell, die darin verwendeten Geräte als Cyber-Physical-Devices und das herzstellende Produkt als Cyber-Physical-Product definiert. Das Produkt besteht aus einer virtuellen Repräsentation, die einen Montagevorranggraphen beinhaltet. Die Methode sieht den Abgleich der Anforderungen des Montagevorranggraphen mit den Fähigkeiten der Roboterzelle vor und bei Erfüllung eine Prozesszuweisung einschließlich einer Prozessoptimierung an die verwendeten Geräte, wodurch die Basis für die anschließende automatisierte Programmierung der Roboterzelle realisiert ist. Die Fähigkeiten der Roboterzelle abstrahieren die Autoren auf die Funktionen und quantitative Parameter der eingesetzten Geräte.

Ansatz nach Müller et al., 2018

In (Müller et al., 2018) werden die Inhalte eines bereits in der Literatur existierenden sechsstufigen Anpassungsprozesses für konventionelle Produktionssysteme vor dem Hintergrund der Aspekte cyber-physischer Produktionssysteme diskutiert. Der Anpassungsprozess erlaubt eine Reaktionsfähigkeit eines produzierenden Unternehmens auf sich ändernde Rahmenbedingungen im Unternehmensumfeld. Die Rahmenbedingungen können sich dabei durch externe und interne Einflüsse ändern, sodass beispielsweise technologische Fortschritte oder Auftragsschwankungen zu einem Anpassungsbedarf bestehender Produktionen führen können. Innerhalb der Betrachtung der sechs Anpassungsphasen wird dargelegt, wie cyber-physische Produktionssysteme eine Anpassung der Produktion begünstigen können. Im Falle der Datenerhebung sehen die Autoren durch die Verwendung cyber-physischer Produktionssysteme und der damit einhergehenden steigenden Vernetzung der Produktion das Potential, diesen Datenbedarf ausreichend decken zu können.

Ansatz nach Ribeiro, 2017

Ribeiro ordnet cyber-physische Produktionssysteme als einen Zusammenschluss von natürlichen und technologischen Ressourcen sowie Produkten ein, die miteinander über Schnittstellen Wissen erschließen und bereitstellen. Der Autor diskutiert konzeptionelle und technologische Herausforderungen, die im Zusammenhang mit der industriellen Einführung von cyber-physischen Produktionssystemen stehen. Der Autor macht auf die Konsequenzen einer gewählten Steuerungsarchitektur aufmerksam, indem die Vor- und Nachteile von hierarchischen und heterarchischen Konzepten aufgezeigt werden. Daran anknüpfend weist der Autor darauf hin, dass die für das betrachtete System gewählte Granularität entscheidend für die Stabilität, aber auch die Komplexität der Interaktionsmöglichkeiten im cyber-physischen Produktionssystem ist und die Modularität von der Granularität entscheidend beeinflusst wird. Die Grundlage dafür bildet auch die Strategie der Dekomposition des betrachteten Systems. Hierbei unterscheidet Ribeiro zwischen der physischen und funktionalen Organisation, wobei das Ziel der Zerlegung in beide Philosophierichtungen anzustreben ist. Für die Integration der cyber-Repräsentation stehen im Wesentlichen die Ansätze einer direkten Modulintegration oder ihrer Kopplung an mehrere Module als Möglichkeiten zur Berücksichtigung der cyber-Repräsentation zur Auswahl, wobei auch hier Mischformen existieren können.

Ansatz nach Schuhmacher & Hummel, 2016

In (*Schuhmacher & Hummel, 2016*) wird eine Forschungsumgebung der Hochschule Reutlingen vorgestellt, die als Lernfabrik Studierenden und Fachkräften Kompetenzen beispielsweise im Bereich cyber-physischer Produktionssysteme vermittelt und den Fokus auch auf die Gestaltung von veränderbaren Produktionssystemen setzt. Der Schwerpunkt der Lernfabrik ist die Untersuchung der Auswirkungen von veränderlichen Produktionssystemen auf die Intralogistik. Die Veränderlichkeit der Fabrik sieht mobile Arbeitsplätze, eine dezentrale Steuerung der Logistik und drahtlose Kommunikationsmöglichkeiten vor, ist jedoch nicht auf diese beschränkt. Letzteres wird durch einen Multiagentensystemansatz realisiert. Die Agenten übernehmen dabei entweder Aufgaben und Dienste, die der Auftragsplanung und -durchführung dienen oder den Einsatz der Ressourcen fokussieren. Das cyber-physische Logistiksystem besteht somit aus einem Zusammenschluss von Software-Agenten, die auf die Bereiche der Logistik, also beispielsweise den Materialfluss, die Arbeitsstationen oder die Lagerung, aufgeteilt sind und untereinander kommunizieren.

Ansatz nach Vogel-Heuser et al., 2020

Die von den Autoren in (*Vogel-Heuser et al., 2020*) verfolgen das Ziel, die Interdisziplinarität von cyber-physischen Produktionssystemen durch einen Entwicklungsansatz zu adressieren, der eine Organisation der verschiedenen Disziplinen ohne domänen spezifische Qualitätsmerkmale zu vernachlässigen, ermöglicht. Die Autoren verdeutlichen die Risiken während der Entstehung von interdisziplinären Systemen, wobei Inkonsistenzen im Gesamtsystem häufig erst während der Realisierungsphase erkennbar werden und in unterschiedlicher Häufigkeit auftreten. Daher schlagen die Autoren zunächst die Verwendung von zwei Konzepten, dem a priori Konzept bei häufig auftretenden und dem a posteriori Konzept bei selten auftretenden Inkonsistenzen vor. Darüber hinaus identifizieren die Autoren den Forschungsbedarf nach einer interdisziplinären Betrachtung, die die Modellierung von cyber-physischen Produktionssystemen sowie eine organisationale Modellierung gleichermaßen berücksichtigt. Für die Lösung sehen die Autoren die Kombination zweier Ansätze vor. Zum einen eine disziplinübergreifende Modellkopplung und zum anderen die Definition von Schnittstellen für die Erkennung von Zusammenhängen besonders bei Änderungen im Gesamtsystem. Die organisationale Perspektive ermöglicht somit auch eine Koordination der beteiligten Unternehmensbereiche.

3.3.2 Stand der Industrie

Ansätze der Automobilindustrie

Cyber-physische Produktionssysteme für die energieeffiziente Komponentenproduktion (Labbus, 2021 – Volkswagen-Aktiengesellschaft)

Das übergeordnete Ziel in der Arbeit von (Labbus, 2021, S. 5-6) ist die Identifizierung und anschließende Verwendung von technologischen Potenzialen zur Energieeffizienzsteigerung in der Automobilproduktion. Zur Erreichung dieses Ziels untersucht der Autor zunächst die Möglichkeiten zur Unterstützung der Planungsbereiche zukünftiger Produktionssysteme. Labbus beschreibt den Bedarf an geeigneten Informationen seitens der Planung, die aus bereits existierenden Daten, auch aus dem Betrieb heraus, gewonnen werden sollen. Der Autor ordnet bei dieser Betrachtung cyber-physische Produktionssysteme als eine Verknüpfung von technologischen Ressourcen und Softwaresystemen ein, wobei jeweils eine bidirektionale Kommunikationsmöglichkeit integriert ist.

Zur Erreichung der formulierten Ziele stellt der Autor ein, aus vier Modulen bestehendes, Gesamtkonzept vor, das sich in die Module der Datenmodellierung und -aufbereitung sowie der Technologieanalyse und Planungswerkzeuge gliedert und die Komponentenproduktion adressiert. Innerhalb dieses Konzeptes bilden die eingesetzten Maschinen den physischen Bereich und die, in Verwaltungsschalen organisierten, Datenmodelle zur Beschreibung der Maschinen den Cyber-Bereich der cyber-physischen Produktion. Die Maschinen werden auch als Datenquelle verwendet, um innerhalb der Datenmodelle Informationen zu bündeln, die dann beispielsweise zur Reduzierung des Implementierungsaufwands führen.

Bewertung der Dissertation von Labbus in Bezug zur Zielstellung dieser Arbeit.

Den eindeutigen Kern der Arbeit bildet die Vorstellung einer konzeptionellen Möglichkeit zur energieeffizienten Komponentenproduktion. Der Autor adressiert in seiner Betrachtung auch cyber-physische Produktionssysteme, die in dieser Arbeit in großen Teilen als physische Maschinen mit dem modularen Konzept zum Daten- und Informationsaufbau interagieren. Eine Untersuchung, wie die betrachteten Bestandteile der cyber-physischen Produktion selbst innerhalb eines Ansatzes erarbeitet werden, sieht die formulierte Zielstellung nicht vor.

Weitere aktuelle und zurückliegende Forschungsarbeiten und -ansätze der Automobilindustrie**Ansätze nach Meixner, 2020 und Meixner et al., 2020 – Volkswagen-Aktiengesellschaft**

In dem Beitrag von (Meixner, 2020) wird eine Forschungsaktivität vorgestellt, die sich mit der Modellierung der Variabilität von cyber-physischen Produktionssystemen beschäftigt und dabei den Produkt-Prozess-Ressourcen (PPR) Modellansatz von (Schleipen et al., 2015) verfolgt. Dabei wird, über bestehende Forschungsaktivitäten hinaus, die Betrachtung struktureller Aspekte von cyber-physischen Produktionssystemen mit verhaltensbezogenen Aspekten kombiniert. Anhand eines abstrahierten industriellen Anwendungsfalls macht der Autor auf die Notwendigkeit einer Gesamtlösung für die Variabilitätsmodellierung von cyber-physischen Produktionssystemen aufmerksam und stellt beispielsweise einen Prioritätsgraphen zur Prozessoptimierung, der variable Produktstrukturen betrachtet, als einen Teil dieser Lösung vor.

In (Meixner et al., 2020) wird der in (Meixner, 2020) vorgestellte Produkt-Prozess-Ressourcen (PPR) Ansatz herangezogen und vor dem Hintergrund der Variabilität in den Bereichen Produkt und Prozess und dessen Auswirkungen auf eine geeignete Ressourcenwahl untersucht. Hierfür schlagen die Autoren ein Vorgehen in vier Schritten vor. Zunächst wird ein PPR-Modell erarbeitet, das als initiales Modell einen Ausgangspunkt darstellt, von dem aus Modellvarianten, beispielsweise für Produktvarianten, geklont werden sollen. Daran anknüpfend wird das Variabilitätsmodell abgeleitet, welches Ähnlichkeiten von gemeinsamen Prozessschritten identifiziert. Im nachfolgenden Schritt werden Fähigkeiten definiert, die die identifizierten Prozesse adressieren. Der letzte Schritt sieht das Zusammentragen der Fähigkeiten einschließlich ihrer Attribute vor und bildet im Ergebnis eine Fähigkeitensammlung. In einer ersten Studie wurde dieses Vorgehen in einer Befragung von Domänenexperten im Allgemeinen angenommen. Gleichzeitig merkten die Experten an, dass ein erheblicher Aufwand für die Wissenssammlung, hinsichtlich der fähigkeitsorientierten Ressourcenauswahl, betrieben werden muss.

Ansatz nach Vater et al., 2020 – BMW-Aktiengesellschaft

In der Arbeit von (Vater et al., 2020) wird ein cyber-physisches System als die Schnittstelle zwischen einem in der Produktion eingesetzten Edge-Gerät und einer Cloud zur echtzeitbasierten Datenverarbeitung formuliert. Darüber hinaus ordnen die Autoren in der Produktion eingesetzte Akteure und Sensoren sowie ein cyber-physisches Interface ebenfalls dem eingesetzten cyber-physischen System zu. Das cyber-physische System ist mit einer Cloud sowie einem Basissystem,

das die Autoren als ein mechatronisches System und damit als physischen Bestandteil betrachten, verknüpft. Über eine Software werden mehrere cyber-physische Systeme organisiert, wodurch auch eine flexible Zuordnung der technologischen Ressourcen erfolgen kann. Eine Schlüsselrolle nimmt das cyber-physischen Interface ein und realisiert die Systeminterne und -externe Kommunikationsfähigkeit. Die Autoren setzen diesen Systemansatz zur optischen Identifikation von Schweißprozessfehlern an Statoren eines Elektromotors ein.

Ansatz in Assadi et al., 2020 – Daimler-Aktiengesellschaft; Bosch-Aktiengesellschaft

In (Assadi et al., 2020) wird eine optimierte Arbeitsplatzzuweisung der Produktionsbelegschaft in cyber-physische Produktionssysteme, also eine, den Autoren nach, hochflexible und rekonfigurierbare Produktionsumgebung untersucht. Der Lösungsansatz verfolgt die Erarbeitung einer Verwaltungsschale, die ein vereinheitlichendes Rahmenwerk zur parametrischen Spezifikation technologischer Ressourcen darstellt (Ruskowski, o. D.). Darauf aufbauend, schlagen die Autoren eine menschorientierte Verwaltungsschale vor. Die Kommunikation zwischen dem Werker und dem Produktionssystem wird über „*Wearables*“ organisiert, also beispielsweise Smartwatches, auf denen Parameter, wie Größe der tragenden Person, bevorzugte Arbeitshöhe, Ausleuchtung des Arbeitsplatzes oder auch Qualifikation, abgelegt sind. Diese Parameter werden dann mit den Parametern der Verwaltungsschale der technologischen Ressourcen verglichen und auf Vereinbarkeit geprüft. Die Autoren legen die Möglichkeiten einer sich hieraus ergebenen hochflexiblen Zuordnung von Werken in einer sich ständig ändernden cyber-physischen Produktionsumgebung dar, weisen jedoch auch ausdrücklich darauf hin, dass zukünftige Arbeiten auch das sensible Thema Datenschutz berücksichtigen werden.

Ansätze von Softwareanbietern

Ansatz nach Calà et al., 2017 - Siemens-Aktiengesellschaft

In (Calà et al., 2017) wird ein Migrationsansatz angestrebt, der bestehende Produktionsanlagen in cyber-physische Produktionssysteme überführt. Die Autoren führen an, dass bestehende Ansätze die Betrachtung von Alternativen während des Migrationsprozesses vernachlässigen. Darauf aufbauend definieren die Autoren hierzu zunächst Anforderungen, die neben einem schrittweisen Vorgehen und der Berücksichtigung von Alternativen auch einen inkrementellen und iterativen Prozess, der ergebnisoffen kurzfristige sowie langfristige Zielstellungen

adressieren soll. Hieraus erarbeiten die Autoren einen fünf-stufigen Migrationsprozess, der kurzfristige Zwischenziele auf dem Weg zur cyber-physischen Produktion fokussiert. Die fünf Phasen gliedern sich in eine Vorbereitungsphase zur Kontextanalyse und Zieldefinition, einer Phase zur Betrachtung und Bewertung von alternativen Migrationslösungen, der Designphase sowie einer Implementierungsphase und der abschließenden Betriebsphase, in der sich das bestehende System dem cyber-physischen Produktionssystem in Gestalt und Funktion annähert. Eine Validierung dieses Ansatzes gilt als ein zentraler Punkt zukünftiger Arbeiten.

Ansatz nach Lohse et al., 2020, Siemens-Aktiengesellschaft

Im Zentrum der Arbeit von (Lohse et al., 2020) steht die Entwicklung eines Real-Time-Reaction-(RTR) Konzepts für cyber-physische Produktionssysteme, dass innerhalb der Produktion entstehende Daten zur Maximierung der Maschinenauslastung und Reduzierung der Produktionskosten nutzen soll. Unter einem cyber-physischen Produktionssystem verstehen die Autoren ein Netzwerk physischer Assets, die wiederum aus elektronischen Komponenten und Informationstechnologien gebildet werden. Die Datenerfassung wird beispielsweise durch ein Lokalisierungssystem der fahrerlosen Transportsysteme realisiert. Für eine dezentrale Entscheidungsfindung, also welche Produktionsreihenfolge beispielsweise ein fahrerloses Transportsystem einzuhalten hat, verwenden die Autoren für das RTR-Konzept die Parameter Zeit, Energieverbrauch und entstehende Kosten. Zu Beginn der Produktion und bei Beendigung jedes Produktionsschrittes identifiziert das Konzept den nächsten Produktionsschritt, indem es die jeweilig für den Produktionsschritt notwendigen Produktionssysteme auf ihre Verfügbarkeit, basierend auf den drei Parametern, bewertet. Das RTR-Konzept konnte in einer idealisierten Fallstudie erfolgreich validiert werden.

Ansatz nach Clark, 2012 - Dassault Systemes

In (Clark, 2012) wird Produktlebenszyklusmanagement Plattform der Firma Dassault Systemes vorgestellt. Der Autor beschreibt, die zu dieser Zeit herrschenden und zu großen Teilen auch zehn Jahre danach noch aktuellen Herausforderungen, die beispielsweise die Systemkomplexität und deren Auswirkungen im Fehlerfall besonders bei vernetzten Systemen betreffen. Clark beschreibt die Notwendigkeit einheitlicher offener Plattformen, vor allem für interdisziplinäre Produkte. Besonders bei der Betrachtung von cyber-physischen Produkten beschreibt der Autor

die Herausforderung der Interdisziplinarität der Systeme. Die Zielstellung sieht hierfür eine durchgängige Modellarchitektur vor, die eine Modellkopplung der verschiedenen Domänen ermöglicht und gleichzeitig den Modellaustausch über offene Schnittstellen unterstützt. Zur Zeit der Veröffentlichung des Beitrags verdeutlichte der Autor die Einzigartigkeit dieser Lösung. Inzwischen werden Plattformen, die ein Produktlebenszyklusmanagement ermöglichen, auch durch andere Wettbewerber am Markt angeboten.

Weitere aktuelle und zurückliegende Ansätze mit industriellem Hintergrund

Ansätze in Huber, 2016

In (Huber, 2016, S. 38-40) werden Herausforderungen und Möglichkeiten von cyber-physischen Produktionssystemen diskutiert. Den Möglichkeiten der Flexibilisierung, Dezentralisierung und der Steigerung der Anpassungsfähigkeit zukünftiger Produktionen durch cyber-physische Produktionssysteme stehen den Risiken der Planbarkeit, Zuverlässigkeit und Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse gegenüber. Der Autor sieht in der Automobilproduktion, und besonders in der Fahrzeugmontage, das größte Potential für einen industriellen Einsatz von cyber-physischen Systemen (Huber, 2016, S. 43). Im Bereich der M2M-Kommunikation diskutiert (Huber, 2016, S. 45) beispielsweise die Übertragung von Behälterdaten, ausgehend von der Produktion, über das im Unternehmen eingesetzte ERP System bis zum Zulieferer des Behälterinhalts (Schmidt, 2008). Im Bereich logistischer Einsatzbeispiele diskutiert (Huber, 2006, S. 46) autonom fahrende Transporteinheiten und mobile Fertigungsinseln der Firma SEW-EURODRIVE, die als mobile Werkbänke und Transportmittel für Produkte dem Werker eine ergonomische und optimale Mensch-Technik-Interaktion erlauben soll (SEW-EURODRIVE, o. D.).

Ansatz in Henning et al., 2015 – fortiss GmbH; Festo-Aktiengesellschaft & Co.KG

Im Zentrum der Untersuchung in der Arbeit von (Henning et al., 2015) steht eine Forschungsunternehmung, die sich zum Ziel setzt, die Vorgehensweise während des Engineerings komplexer Produktionsanlagen von abstrakten Größen zu lösen und auf funktionsorientierte Architekturen zu fokussieren. In der Umsetzung bedeutet dies, aus technologischer Sicht, eine Funktionsintegration in mechanische Komponenten, wodurch zwar die Komponentenkosten steigen, jedoch der geringere Zeitbedarf während der Komponentenintegration einen positiven Einfluss auf die Kostenentstehung während der Realisierungsphase der Produktion hat. Die

Autoren diskutieren auch einen funktionsorientierteren Engineering-Prozess, indem die Auswahl und Verkettung von Funktionen der verwendeten Komponenten eine starre Programmierung der Produktionssteuerung ersetzt. Darüber hinaus begünstigt das Vorgehen auch eine Dezentralisierung der Komponentensteuerungen. Der Ansatz wurde anhand eines Demonstrators validiert, wobei die Autoren die Vorteile des geringeren Verkabelungs- und Engineering-Aufwands, bedingt durch den funktionsorientierten Ansatz, diskutieren.

Ansatz in Keil, 2017 – Infineon-Technologies-Aktiengesellschaft

In (Keil, 2017) wird die Einführung von cyber-physischen Produktionssystemen in der Halbleiterindustrie diskutiert. Die Autorin folgt zur Beschreibung von cyber-physischen Produktionssystemen den Ausführungen von (Lee et al., 2015; Geisberger & Broy, 2015) und sieht den Einsatz von cyber-physischen Produktionssystemen darüber hinaus als eine Teillösung intelligenter Systeme. Intelligente Systeme ordnet Keil auch als dezentral organisierte und selbstständig arbeitende Produktionsentitäten ein. In der konkreten Umsetzung setzt Keil ein Multiagentensystem ein, das in der Lage ist, die Vorgehensweise eines Produktionsvorhabens in verschiedene Aufgaben, entsprechend eines Produktionsplans, auf die Agenten zu verteilen und somit den Aspekt der Selbstorganisation zu erfüllen. Keil ordnet darüber hinaus ein Transportmodul als ein cyber-physisches Produktionslos ein. Das cyber-physische Produktionslos ist mit Kommunikationsmöglichkeiten, einer Sensorik sowie einer eigenen Leistungsversorgung ausgestattet und in der Lage, über einen Micro-Controller, Aufgaben der Produktionsplanung auszuführen. Die Autorin verdeutlicht die erreichten Möglichkeiten zur Selbstorganisation, weist aber auf eine sukzessive Einführung des Ansatzes hin, da bestehende Vorgehensweisen bei Produktionsausfällen nicht außer Kraft gesetzt werden können.

3.3.3 Zusammenfassung des Standes der Technik cyber-physischer Produktionssysteme

Dieses Kapitel liefert eine Übersicht aktueller sowie zurückliegender Arbeiten und Ansätze aus der Forschung und Industrie, die sich mit der Konzeption, Planung und Entwicklung aber auch mit der Realisierung und dem Betrieb von cyber-physischen Produktionssystemen beschäftigen. Aktuelle Umsetzungshemmnisse ergeben sich durch das fehlende Verständnis zur Charakterisierung von cyber-physischen Produktionssystemen, weshalb die gewählten Konkretisierungsansätze in den vorgestellten Arbeiten nachfolgend näher betrachtet werden.

Darüber hinaus werden die Einsatzbereiche cyber-physischer Produktionssysteme diskutiert und deren Auswirkungen auf konventionelle Produktionen untersucht.

Konkretisierungsansätze zur Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme

In den betrachteten Arbeiten findet sich eine Vielzahl von Konkretisierungsansätzen zur Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme, von denen drei Ansätze näher betrachtet werden. Innerhalb eines ersten **Konkretisierungsansatzes (KA1)** übertragen einige Arbeiten bestehende Definitionen, beispielsweise von (Lee, 2006, S. 1), über cyber-physische Systeme auf cyber-physische Produktionssysteme und weisen auf zusätzliche Aspekte wie Autonomie, eine erhöhte Interaktionsfähigkeit der Systeme untereinander oder, viel allgemeiner, auf strategische und ökonomische Möglichkeiten in der zukünftigen Produktionsausrichtung hin (Kolberg, 2016; Hammerstingl, 2020; Theiss, 2015; Francalanza et al., 2017; Francalanza et al., 2018; Müller et al., 2018; Meixner, 2020; Vater et al., 2020; Huber, 2016; Keil, 2017). In einem zweiten **Konkretisierungsansatz (KA2)** wird ein System-of-Systems-Ansatz beschrieben, wobei sich mehrere cyber-physische Systeme zu einem cyber-physischen Produktionssystem zusammenschließen (Heisig, 2016; Berger et al., 2019; Michniewicz & Reinhart, 2014; Schuhmacher & Hummel, 2016). Ein dritter **Ansatz zur Konkretisierung (KA3)**, den ein Großteil der betrachteten Veröffentlichungen, auch als Ergänzung der ersten beiden Konkretisierungsansätze, verwendet, ist die Nutzung von Fähigkeiten, die entweder durch cyber-physische Produktionssysteme grundsätzlich erreicht oder gegenüber konventionellen Produktionssystemen ausgebaut bzw. erhöht werden. Diese Fähigkeiten werden nachfolgend als Auswirkungen von cyber-physischen Produktionssystemen auf konventionelle Produktionssysteme betrachtet.

Einsatzbereiche cyber-physischer Produktionssysteme

Die Einsatzbereiche von cyber-physischen Produktionssystemen können, bezogen auf die betrachteten Arbeiten und Ansätze, in der Produktion, Fertigung, Montage und Logistik verortet werden, sind jedoch nicht darauf beschränkt und können innerhalb dieser Einsatzbereiche weiter untergliedert werden. Eine Einordnung in die, in Kapitel 3.2.3 vorgestellten, Unternehmensebenen ist im Kontext der jeweiligen Anwendungsfälle zwar oft uneindeutig, jedoch besteht ein Konsens darüber, dass cyber-physische Produktionssysteme grundsätzlich dem Ansatz folgen, über jede Unternehmensebene hinweg mit anderen Systemen des

Unternehmens interagieren zu können. Eine konkrete Beschreibung und Realisierung dieser Interaktionsmöglichkeit, die auch die Zielstellung dieser Arbeit adressiert, ist jedoch nicht identifizierbar.

Auswirkungen cyber-physischer Produktionssysteme auf konventionelle Produktionssysteme

Ein überwiegender Teil der betrachteten Arbeiten konkretisiert ein cyber-physisches Produktionssystem durch die Nutzung von Merkmalen oder Charakteristiken, die im Produktionsumfeld, häufig auch als Benefits, Vorteile im industriellen Wettbewerb adressieren. Dies gilt als der dritte Konkretisierungsansatz, dem eine gesonderte Betrachtung, aufgrund seiner Vielseitigkeit in dieser Arbeit zukommt. Demzufolge zeichnen sich cyber-physische Produktionssysteme gegenüber konventionellen Produktionssystemen dadurch aus, dass sie über eine generelle oder erhöhte Intelligenz, Flexibilität, Robustheit oder Interaktionsfähigkeit verfügen. Über alle in diesem Kapitel vorgestellten Arbeiten hinweg lassen sich hierzu 26 Charakteristiken identifizieren, die mehrmals innerhalb der vorgestellten Arbeiten zur Beschreibung von cyber-physischen Produktionssystemen genannt worden sind. Die identifizierten Charakteristiken werden im Betrachtungskontext dieses Kapitels als Auswirkungen cyber-physischer Produktionssysteme auf konventionelle, also nicht als cyber-physische Produktionssysteme, definiert und in einem Auswirkungsindex in *Tabelle 3.3-1* gesammelt und zu Vergleichszwecken in *Tabelle 3.3-2* verwendet.

Tabelle 3.3-1. Auswirkungsindex cyber-physischer Produktionssysteme.

Auswirkungsindex					
No.	Auswirkung	No.	Auswirkung	No.	Auswirkung
1	Flexibilität	10	Modularität	19	Netzwerkfähigkeit
2	Selbstkonfigurierbarkeit	11	Selbstorganisation	20	Sicherheit
3	Rekonfigurierbarkeit	12	Verteilung	21	Leistungsfähigkeit
4	Interoperabilität	13	Dezentralisierung	22	Transformierbarkeit
5	Veränderungsfähigkeit	14	Adaptivität	23	Wandlungsfähigkeit
6	Anpassungsfähigkeit	15	Transparenz	24	Skalierbarkeit
7	Selbstbeschreibung	16	Ressourceneffizienz	25	Integrierbarkeit
8	Selbstvernetzung	17	Echtzeitfähigkeit	26	Agilität
9	Robustheit	18	Intelligenz		

Tabelle 3.3-2. Stand der Technik in Forschung und Industrie im Kontext cyber-physischer Produktionssysteme.

Arbeiten und Ansätze	Konkretisierungsansatz (KA)	Fokussierter Bereich im Lebenszyklus	Unternehmensbereich	Einsatzbereiche		Auswirkungen auf konv. Produktionen
				Ebenenbereich	Ebene	
Hammerstingl, 2020	n. b.	Betriebsphase	Montage	E1-E3	1, 2, 3, 4, 5, 6	
Theiss, 2015	KA-1	Planungs- und Entwicklungsphase	Fertigung, Automatisierung	E1-E7	1, 9, 10, 11, 12	
Heisig, 2016	KA-2	Planungs- und Entwicklungsphase	Produktion	n. b.	1, 13, 14, 15, 16	
Berger et al., 2019	KA-2	Betriebsphase	Fertigung	n. b.	2, 12, 13, 17, 18, 19	
Francalanza et al., 2017	KA-1	Entwurfsphase CPPS	Produktion	n. b.	1, 3, 5, 6, 13, 20, 21, 22, 23	
Francalanza et al., 2018	KA-1	Entwurfsphase CPPS	Produktion, Handhabung	n. b.	3, 5, 10, 24	
Kollberg, 2016	KA-1	Entwurfsphase CPPS	Produktion	n. b.	5, 10	
Michniewicz & Reinhart, 2014	KA-2	Planungs- und Entwicklungsphase	Fertigung, Montage	E1-E3	1, 3, 10	
Müller et al., 2018	KA-1 & KA-3	Betriebsphase	Produktion, Logistik	E4-E7	1, 5, 6, 23	
Ribeiro, 2017	n. b.	Entwurfsphase CPPS	Produktion	E1-E2 & E5	1, 3, 6, 10, 14, 24, 25	
Schuhmacher & Hummel, 2016	KA-2	n. b.	Montage, Logistik	n. b.	3, 5, 9, 13, 23	
Vogel-Heuser et al., 2020	n. b.	Planungs- und Entwicklungsphase	Produktion	n. b.	18	
Labbus, 2021	n. b.	Betriebsphase	Produktion	n. b.	1	
Meixner, 2020	KA-1	Planungs- und Entwicklungsphase	Montage	n. b.	1, 3, 6	
Meixner et al., 2020	n. b.	Planungs- und Entwicklungsphase	Montage	n. b.	1, 3, 6	
Vater et al., 2020	KA-1	Betriebsphase	Fertigung	n. b.	10, 17	
Assadi et al., 2020	KA-3	Planungsphase	Montage	E1-E4	1, 3	
Anra et al., 2017	KA-3	Planungs- und Entwicklungsphase	Produktion	n. b.	1, 3, 6, 10, 13	
Lohse et al., 2020	n. b.	Betriebsphase	Montage, Fertigung	E1-E5	1, 13	
Clark, 2021	n. b.	Planungs- und Entwicklungsphase	Produktion	n. b.	n. b.	
Huber, 2016	KA-1 & KA-3	Betriebsphase	Logistik	n. b.	1, 2, 6, 10, 13, 14, 23, 24, 26	
Henning et al., 2015	KA-3	Realisierungsphase	Fertigung	E1-E4	1, 10, 13, 18	
Keil, 2017	KA-1 & KA-2 & KA-3	Planungs- und Entwicklungsphase	Fertigung, Logistik	n. b.	11, 13, 18	

3.4 Virtuelle Inbetriebnahme cyber-physischer Produktionssysteme

In diesem Kapitel werden Arbeiten und Ansätze aus der Forschung und Industrie vorgestellt, die die virtuelle Inbetriebnahme im Kontext cyber-physischer Produktionssysteme verwenden. Darüber hinaus werden Arbeiten und Ansätze betrachtet, die eine virtuelle Modellbildung cyber-physischer Produktionssysteme berücksichtigen und damit auch eine Möglichkeit zur modellbasierten Vorbereitung der virtuellen Inbetriebnahme darstellen könnten.

3.4.1 Stand der Forschung

Ansatz nach Novak et al., 2017

In (*Novak et al., 2017*) wird ein Ansatz zur Simulation und Organisation von Fertigungsanlagen auf Fabrikebene mit Fokus auf den Materialfluss vorgestellt. Der Ansatz vereint hierzu die Simulationsumgebung Siemens Plant Simulation mit dem Konfigurationswerkzeug, *P'X5 Configurator for Montratec*. Letzteres wird zur Organisation der Informationen der in der Simulation verwendeten technologischen Ressourcen eingesetzt. Der Ansatz soll auch cyber-physische Produktionssysteme adressieren, indem eine modellgetriebene Vorgehensweise verfolgt wird, die komplexe Systeme auf höherer Abstraktionsebene darstellt und Modelle, beispielsweise aus heterogenen Quellen, in Metamodellen organisiert. Während das Konfigurationswerkzeug dem Simulationswerkzeug Informationen über die eingesetzten virtuellen Modelle zur Verfügung stellt, liefert die Simulation Informationen für die Topologie der simulierten Produktionssysteme an das Konfigurationswerkzeug. Da der vorgestellte Ansatz als eine „Work-in-Progress“ Arbeit veröffentlicht ist, stehen weitere Validierungen des Ansatzes aus. Eine konkrete Beschreibung, wie der Ansatz im Rahmen einer virtuellen Inbetriebnahme eingesetzt werden kann oder welcher Stellenwert sich für die Entwicklungsphasen von cyber-physischen Produktionssystemen ergibt, kann nicht eindeutig identifiziert werden.

Ansatz nach Stark et al., 2017

In (*Stark et al., 2017*) definieren die Autoren cyber-physische Systeme als physikalische und technische Systeme, deren Interaktionen zwischen diesen Domänen durch eine übergeordnete Instanz, einem Rechnerkern, organisiert wird. Dabei schließen sich mehrere in der Fertigung eingesetzte cyber-physische Systeme zu einem cyber-physischen Produktionssystem zusammen.

Die Autoren führen an, dass der Entwurf cyber-physischer Produktionssysteme durch einen softwareorientierten Ansatz gekennzeichnet ist. Für den Entwurf von cyber-physischen Produktionssystemen diskutieren die Autoren ein in zwölf Schritte gegliedertes Vorgehen als Teil eines modularen Baukastens, der Fertigungssysteme in einzelne Funktionseinheiten gliedert und eine anschließende Zuordnung von erweiterten und interdisziplinären Teilmodellen erlaubt. Die konkreten Inhalte der Teilmodelle entsprechen in vielen Aspekten auch den Inhalten des in dieser Arbeit formulierten Modellvorbereitungsprozess der virtuellen Inbetriebnahme. Zwar diskutieren die Autoren die Möglichkeit der Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme im Anschluss an das zwölf-stufige Vorgehen, die konkreten Inhalte dieses Prozesses bleiben in dem Beitrag jedoch uneindeutig.

Ansatz nach Glatt & Aurich, 2019

In der Arbeit von (*Glatt & Aurich, 2019*) steht die Untersuchung der Auswirkungen von cyber-physischen Produktionssystemen auf Materialflusssysteme im Vordergrund. Die Autoren verstehen unter cyber-physischen Systemen miteinander verbundene und in der Produktion eingesetzte eingebettete Systeme, die über Sensoren und Aktoren mit der Umwelt interagieren und eine hohe Reaktionsfähigkeit gegenüber Veränderungen im Produktionsumfeld aufweisen. Aus der Perspektive der Materialflusssysteme erschweren cyber-physische Produktionssysteme durch ihre Möglichkeiten der flexiblen und rekonfigurierbaren Großserienfertigung die Planung zukünftiger Materialflusssysteme, indem die Varianz der physikalischen Werkstückeigenschaften und die Varianz der Produktionswege steigen. Die Autoren schlagen für eine simulationsbasierte Validierung dieser komplexen Materialflusssysteme ein physikbasiertes Simulationsmodell vor, das auch die Möglichkeit bieten soll, während des Betriebs der Produktion Stillstandzeiten zu verringern und variierende Materialflussfade zu berücksichtigen. Das vorgeschlagene physikbasierte Simulationsmodell verfolgt einen bottom-up Ansatz, berücksichtigt die physikalischen und geometrischen Eigenschaften der Simulationsobjekte einschließlich der Pfadbeschreibung im Materialflusssystem und wird mit den dafür benötigten Informationen aus dem cyber-physischen Produktionssystem, versorgt. Das Simulationsmodell wird anhand eines fahrerlosen Transportsystems, das die Autoren als eine Grundlagentechnologie von cyber-physischen Produktionssystemen definieren, zunächst erfolgreich validiert. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass weitere Untersuchungen notwendig sind, um innerhalb der Simulation die industrielle Komplexität vollumfänglich abbilden zu können.

3.4.2 Stand der Industrie

Ansatz nach Brandstetter & Wehrstedt, 2018 und Brandstetter et al., 2018

In der Arbeit von (*Brandstetter & Wehrstedt, 2018*) wird ein Co-Simulationsframework vorgestellt, welches verschiedene Engineering- und Simulationswerkzeuge bündelt und den domänenspezifischen Einsatz in einem übergeordneten Simulationswerkzeug, dem Framework, realisiert. Die Organisation der Simulationswerkzeuge übernimmt in diesem Framework ein Simulationskoordinator, der über Schnittstellen, mit den verschiedenen Simulationswerkzeugen interagiert und für die Synchronisation der Simulationen zuständig ist. Für die Validierung verwenden die Autoren einen Zusammenschluss aus einer Kinematiksimulation in Siemens-Process-Simulate, der Emulation einer speicherprogrammierbaren Steuerung in Siemens PLCSim Advanced und Modelica zur Darstellung eines elektrischen Antriebes in einer Drehtischzelle, bestehend aus Drehtisch, Schutztür und Industrieroboter. Die Interaktionsfähigkeit unter den eingesetzten Simulationstools sehen die Autoren, mit dem Austausch von definierten Variablen, als erfüllt an. Die Autoren machen außerdem auf die Erweiterungsfähigkeit des Frameworks aufmerksam, wodurch es als besonders vielversprechend für cyber-physische Produktionssysteme eingeordnet wird, ohne jedoch eine detailliertere Beschreibung hierzu zu formulieren.

In dem Beitrag von (*Brandstetter et al., 2018*) wird das in (*Brandstetter & Wehrstedt, 2018*) vorgestellte Framework aus der Perspektive des Modellierungsprozesses vor der virtuellen Inbetriebnahme näher betrachtet. Der Modellierungsprozess des Frameworks bietet die Möglichkeit, bestehende Verhaltensmodelle in einem standardisierten Austauschformat zur Beschreibung des Komponentenverhaltens zu berücksichtigen. Darüber hinaus ist die Einbindung aller Simulationswerkzeuge, in einem abschließenden Schritt vor der Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme, Teil des vorgestellten Modellierungsprozesses. In einer, bei der Volkswagen AG durchführten, Umfrage, zur Einschätzung der Framework-Umsetzung des Modellierungsaufwandes und der Synchronisation der Simulationswerkzeuge würdigten 20 befragte Mitarbeiter aus verschiedenen Entwicklungsbereichen den vorgestellten Ansatz. Die Autoren in (*Brandstetter et al., 2018*) konkretisieren cyber-physische Produktionssysteme, indem sich diese Produktionssysteme durch eine starke Vernetzung vieler Einzelsysteme, die während der Betriebszeit konventionelle System-, Organisations- und Domänengrenzen überschreiten, kennzeichnen.

Ansatz nach Weyer et al., 2016

In (Weyer et al., 2016) wird ein Framework für die Modellierung und Simulation von, auf cyber-physischen Systemen basierenden, Fabriken erarbeitet. Cyber-physische Produktionssysteme bestehen, nach Ansichten der Autoren, aus Netzwerken von autonomen Komponenten mit lokaler Steuerungsintelligenz, die in der Lage sind mit anderen technologischen Ressourcen zu kommunizieren, wodurch auch dezentrale, agile und flexible Produktionsstrukturen entstehen. Für die Erarbeitung des Frameworks diskutieren die Autoren den zukünftigen Bedarf an Simulationen, wobei die virtuelle Inbetriebnahme als ein Hauptinteresse des Industriesektors eingeordnet wird. Gleichzeitig diskutieren die Autoren die Herausforderungen einer digitalen Durchgängigkeit entlang des Produktionslebenszyklusses, der Synchronisation zwischen der realen und digitalen Welt und die Notwendigkeit einer multidisziplinären Simulationsumgebung. Daran anknüpfend wird ein dreistufiges Referenzframework vorgestellt, das im Wesentlichen aus einer Benutzerschnittstelle für Anwender von Simulationswerkzeugen, einer funktionalen Prozesslogik zur Daten- und Modellorganisation und einer cyber-physischen Datenerfassungsebene besteht. Dieses Referenzframework wird bei der Volkswagen-Aktiengesellschaft im Karosseriebau diskutiert. Hierzu existiert eine sehr heterogene Datenlandschaft, wobei die Daten- und Modellorganisation durch eine Schnittstelle gehandhabt werden können. Diese Schnittstelle erlaubt dem Anwender kontextuale Informationen über die in der Simulation eingesetzten cyber-physischen Komponenten zu erhalten. Das Verhalten der Komponenten kann innerhalb einer virtuellen Inbetriebnahme überprüft werden. Das Konzept befindet sich zum Zeitpunkt der Veröffentlichung des Beitrags noch in Validierungsvorgängen, weshalb eine Einordnung der cyber-physischen Aspekte innerhalb der verwendeten Komponenten uneindeutig ist.

Ansatz nach Meyer et al., 2018

In dem Beitrag von (Meyer et al., 2018) werden innerhalb des MAYA-Forschungsprojektes diskutierte Anwendungen in das Referenzarchitekturmodell für Industrie 4.0 (RAMI 4.0) eingeordnet. Das RAMI 4.0 Modell ist ein, von der Plattform Industrie 4.0 vorgestelltes, Rahmenwerk, das eine Einordnung und Klassifizierung von physischen Objekten, aber auch digitalen Prozessen in ein einheitliches Schichtenmodell mit einer standardisierten Hierarchie nach IEC 62264 und IEC 61512 erlaubt. Das MAYA-Forschungsprojekt, in dem auch die Beiträge

von (*Brandstetter & Wehrstedt, 2018*) und (*Brandstetter et al., 2018*) verortet sind, untersucht Möglichkeiten zur Entwicklung von Simulationsmethoden und -Werkzeugen zur Erarbeitung von cyber-physischen Fabrikumgebungen, die die Autoren als heterogene und skalierbare Produktionsumgebungen beschreiben. Vor allem die virtuelle Inbetriebnahme schätzen die Autoren als eine zentrale Herausforderung, besonders aus der Perspektive der Automobilindustrie, ein. Vor dem Hintergrund der Zielstellung in dieser Arbeit diskutieren die Autoren beispielsweise die Notwendigkeit der Beschreibung der Verhaltenslogik von eingesetzten Feldgeräten zur virtuellen Inbetriebnahme. Die Verhaltenslogik wird innerhalb des RAMI-Modells in der Unternehmenshierarchie auf der Feldebene definiert, für Qualitätsprüfungszwecke auf Integrationsebene und im Lebenszyklus auf der Anlagenebene verwendet. Ein weiteres Beispiel konzentriert sich auf Bibliotheken für eingesetzte cyber-physische Systeme, die einen Zusammenschluss aller Domänenbibliotheken zu einer gemeinsamen Bibliothek fokussieren. Die Bibliothek der cyber-physischen Systeme verorten die Autoren innerhalb der Unternehmenshierarchie auf Steuer- und Feldebene sowie auf der Informations-, Kommunikations- und Integrationsebene hinsichtlich ihrer Funktionsbereiche und wirken zunächst ausschließlich auf der Typ-Ebene im Lebenszyklus mit der Möglichkeit einer nachträglichen Instanziierung.

Ansatz nach Zeman et al., 2016 - Stahlindustrie

Die Autoren in (*Zeman et al., 2016*) diskutieren die Voraussetzungen für einen erfolgreichen Einsatz von cyber-physischen Produktionen auch in industriellen Anwendungen. Cyber-physische Produktionssysteme sind, nach Ansicht der Autoren, durch Verknüpfungen von verteilten Computern und Rechnereinheiten mit physischen Objekten innerhalb der Produktion gekennzeichnet. Aus der physischen Umgebung gewonnene Informationen können innerhalb der verteilten Computer dazu eingesetzt werden, um bei komplexen Anlagenstrukturen eine umfassende Betrachtung der Betriebszustände zum einen zu erfassen und zum anderen daraus gezieltere Maßnahmen zur Beeinflussung der physischen Produktionsumgebung abzuleiten. Die Autoren diskutieren die hierzu notwendige Voraussetzung einer Virtualisierung der physischen Produktionselemente. Die sich aus den unterschiedlichen Disziplinen ergebenen virtuellen Modelle der Produktion dienen dem Einblick in einzelne Produktionsschritte und kritische Prozessdetails. Ein konkretes Anwendungsbeispiel diskutieren die Autoren im Umfeld der Stahlindustrie. Gegenstand der Betrachtung sind Walzanlagen und Warmbreitbandstraßen zur

Optimierung von Materialeigenschaften beispielsweise durch gezieltes Temperieren der verwendeten Materialien. Die Virtualisierung der Produktion erlaubt, den Autoren nach, eine umfassendere und dynamische Regelung der Kühlstrecke, auch durch einen Einsatz einer hochflexiblen Aktuatorik und wirkt sich, als Konsequenz, positiv auf die Wettbewerbsfähigkeit am globalen Markt aus. Einen detaillierten Einblick in die Modellerstellung und Verknüpfung, vor allem mit den physischen Elementen der Produktion, wird in der Arbeit jedoch nicht eindeutig diskutiert.

3.4.3 Zusammenfassung des Standes der Technik der virtuellen Inbetriebnahme cyber-physischer Produktionssysteme

In diesem Kapitel werden Arbeiten aus der Forschung und Industrie vorgestellt, die sich mit der virtuellen Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen befassen. Darüber hinaus wird auch ein Fokus auf Ansätze für Modellbildungsprozesse gelegt. Eine Übersicht der Inhalte der betrachteten Arbeiten ist in *Tabelle 3.4-1* umgesetzt. Der Großteil der in diesem Kapitel vorgestellten Ansätze folgt den Konkretisierungsansätzen zur Beschreibung von cyber-physischen Produktionssystemen, die in *Kapitel 3.3.3* definiert wurden. Die für die virtuelle Inbetriebnahme eingesetzte Software lässt sich nur in wenigen Arbeiten eindeutig identifizieren.

Darüber hinaus wählen die Autoren der Arbeiten bei der Durchführung einer Simulation oder virtuellen Inbetriebnahme häufig eine Software-In-the-Loop Simulationskonfiguration, oft auch in Verbindung mit einem Co-Simulationsansatz. Letzteres ist in seiner Häufigkeit dadurch begründet, dass die betrachteten Arbeiten unter einem gemeinsamen Forschungsprojekt entstanden.

Die vorgestellten Arbeiten sind in weiten Teilen im Unternehmensbereich der Produktion, mit punktuellen Erweiterungen zur Fertigungs- und Materialflussplanung industrieller Produktionen, verortet. Eine zusätzliche Einordnung der Ansätze in eine Unternehmenshierarchie ist häufig nicht Gegenstand der Zielstellungen. Dennoch nutzen die Autoren der Arbeiten in diesem Kapitel Merkmale und Charakterisierungen zur Beschreibung der Auswirkungen von cyber-physischen Produktionssystemen auf konventionelle Produktionssysteme, wie bereits in *Kapitel 3.3.3* beschrieben.

Tabelle 3.4-1. Stand der Technik in Forschung und Industrie für Ansätze der virtuellen Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen.

Arbeiten und Ansätze	Konkretisierungsansatz (KA)	Software	Simulationskonfiguration	Einsatzbereiche Unternehmensbereich	Ebene	Auswirkungen auf konv. Produktionen
Novák et al., 2017	n. b.	Siemens Plant Simulation; P\x5 Configurator	SIL	Fabrikebene; Materialfluss	n. b.	n. b.
Stark et al., 2017	KA 2	n. b.	SIL	Fertigung	n. b.	Flexibilität; Echtzeitfähigkeit; Intelligenz
Glatt & Aurich, 2019	KA 1	n. b.	SIL	Materialflusss	n. b.	Flexibilität; Rekonfigurierbarkeit
Brandstetter & Wehrstedt, 2018	KA 1	Siemens Process Simulate; PLC-Sim-Advanced; TIA Portal; Modelica	SIL; Co-Simulation	Produktion	n. b.	Rekonfigurierbarkeit
Brandstetter et al., 2018	KA 1	Siemens Process Simulate; PLC-Sim-Advanced; Verhaltensmodelle	SIL; Co-Simulation	Produktion	n. b.	n. b.
Weyer et al., 2016	KA 1 & KA 3	n. b.	Co-Simulation	Produktion	n. b.	Flexibilität; Rekonfigurierbarkeit; Anpassungsfähigkeit; Modularität; Dezentralisierung; Skalierbarkeit; Agilität
Meyer et al., 2018	n. b.	n. b.	Co-Simulation	Produktion	n. b.	Skalierbarkeit
Zeman et al., 2016	n. b.	n. b.	n. b.	Fertigung	E1-E4	Flexibilität

4 Defizite und Handlungsbedarf

Kapitel vier erläutert Defizite des Standes der Technik in Forschung und Industrie zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage in dieser Arbeit und formuliert daran anknüpfend einen Handlungsbedarf. Die erlangten Erkenntnisse aus dem vorgehenden Kapitel werden gleichermaßen zur Präzisierung der Zielstellung und thematischen Abgrenzung der Arbeit herangezogen.

4.1 Defizite

Im Zentrum dieser Arbeit steht die Beantwortung der nachfolgenden übergeordneten Forschungsfrage, die die Ausgangsbasis darstellt und einen groben Handlungsrahmen formt.

Forschungsfrage:

„Wie verändert sich die virtuelle Inbetriebnahme durch den Einsatz cyber-physischer Produktionssysteme?“

Auf Basis der vorgestellten Arbeiten und Ansätze im vorgehenden Kapitel Stand der Technik in Forschung und Industrie kann diese Forschungsfrage nur in Teilen konkret beantwortet werden. Es ist zunächst zu untersuchen, wie konkret cyber-physische Produktionssysteme beschrieben werden können. Neben den Konkretisierungsansätzen, die sich auf bestehende, teilweise auch domänenspezifische, Definitionen stützen oder einen System-of-Systems Ansatz verfolgen, verwendet der Großteil bestehender Arbeiten einen dritten Konkretisierungsansatz KA3. Dieser Konkretisierungsansatz adressiert Charakteristiken und Merkmale, die Produktionen durch die Einführung cyber-physischer Produktionssysteme erfahren. Durch diverse domänenspezifische Perspektiven entsteht jedoch eine Vielzahl solcher Charakteristiken, die in einer domänenübergreifenden Betrachtung in verschiedenen Konstellationen auftreten können und nicht entscheidend zu einer Konkretisierung cyber-physischer Produktionssysteme beitragen.

Darüber hinaus werden die Charakteristiken in den vorgestellten Arbeiten unterschiedlich definiert, wodurch bei domänenübergreifender Betrachtung der Definitionen häufig widersprüchliche inhaltliche Aspekte identifiziert werden können. Der Gebrauch von Synonymen

in der Charakteristik Bezeichnung und eine häufig angewendete wörtliche Übersetzung aus der deutschen in die englische Sprache und umgekehrt, besonders bei internationalen Arbeiten und Veröffentlichungen, begünstigen diesen Eindruck.

Teilweise existieren bereits Arbeiten und Ansätze, die die identifizierten Charakteristiken zur Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme innerhalb einer virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigen. Jedoch fehlt diesen Arbeiten häufig der grundsätzliche Bezug zu cyber-physischen Produktionssystemen, teilweise auch, weil diese Arbeiten und Ansätze bereits vor der wissenschaftlichen Diskussion über cyber-physische Produktionssysteme existierten. Ein anderer Grund, der in diesen Arbeiten einen Bezug zu cyber-physischen Produktionssystemen erschwert, ist die Tatsache, dass cyber-physische Produktionssysteme in der wissenschaftlichen Literatur aus einer Kombination von Charakteristiken beschrieben werden. Eine kombinierte Betrachtung von cyber-physischen Produktionssystem beschreibenden Charakteristiken und deren Absicherung innerhalb eines virtuellen Inbetriebnahme Prozesses, ist in Form einer wissenschaftlichen Arbeit bisher nicht eindeutig zu identifizieren.

Andere Arbeiten und Ansätze, die eine virtuelle Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen thematisieren, verfolgen häufig einen Co-Simulationsansatz und adressieren dabei die Interdisziplinarität cyber-physischer Produktionssysteme, jedoch nicht ihre Charakteristiken. Der Vorteil des Co-Simulationsansatzes sind die Ergänzungsmöglichkeiten von Simulationswerkzeugen zur Darstellung und Validierung verschiedenster Domänen in der Produktion. Gleichzeitig setzt dieser Ansatz ein Anwenderwissen voraus, das häufig über die Kenntnisse der konventionellen virtuellen Inbetriebnahme hinausgeht.

Eine Arbeit oder ein Ansatz der die Möglichkeiten der konventionellen virtuellen Inbetriebnahme für eine Validierung von cyber-physischen Produktionssystemen untersucht und dabei eine konkrete Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme vorschlägt ist nicht eindeutig identifizierbar.

4.2 Handlungsbedarf

Auf Grundlage der identifizierten Defizite zur Beantwortung der übergeordneten Forschungsfrage kann ein Handlungsbedarf für diese Arbeit formuliert werden. Zunächst ist zu

untersuchen, wie eine eindeutige Beschreibung von cyber-physischen Produktionssystemen erarbeitet werden kann. Diese Arbeit folgt dabei dem Großteil wissenschaftlicher Arbeiten zur Konkretisierung cyber-physischer Produktionssysteme, die Charakteristiken zur Beschreibung wählen. Über die bestehenden Ansätze hinaus, ist es erforderlich, existierende Charakteristiken gesamtheitlich, also ohne eine voreingenommene Auswahl von Charakteristiken, zu ordnen und Definitionen vorzuschlagen, die deutliche Differenzierungen zwischen den Charakteristiken anbieten. Dadurch kann auch eine domänenübergreifende Verwendung der Charakteristiken unter einem einheitlichen Verständnis der wesentlichen inhaltlichen Aspekte der Charakteristiken sichergestellt werden. Damit der Prozess der virtuellen Inbetriebnahme auch für cyber-physische Produktionssysteme Anwendung finden kann, ist zu untersuchen, wie die identifizierten Charakteristiken virtuell abgebildet und innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden können. Dabei konzentriert sich diese Arbeit auf die konventionelle virtuelle Inbetriebnahme und ihren Modellbildungsprozess. In der wissenschaftlichen Literatur werden cyber-physische Produktionssysteme zum Großteil nicht allein durch eine Charakteristik beschrieben, sondern vielmehr durch Kombinationen mehrerer Charakteristiken. Vor diesem Hintergrund ist in dieser Arbeit zu untersuchen, wie über bestehende Ansätze hinaus nicht nur einzelne Charakteristiken innerhalb des Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden können, sondern auch wie die Charakteristiken kombiniert betrachtet und in die virtuelle Produktionsumgebung zu integrieren sind.

4.3 Präzisierte Zielstellung

Anknüpfend an den Defiziten und der Darstellung des Handlungsbedarfs sind, zur Beantwortung der übergeordneten *Forschungsfrage (FF1)*, weitere *Forschungsfragen (FF2-5)* zu definieren, die aufeinander aufbauend die übergeordnete *Forschungsfrage (FF1)* beantworten sowie Teilziele dieser Arbeit darstellen. Die übergeordnete *Forschungsfrage (FF1)* dieser Arbeit bildet die erste Forschungsfrage der präzisierten Zielstellung.

Forschungsfrage FF1:

„Wie verändert sich die virtuelle Inbetriebnahme durch den Einsatz cyber-physischer Produktionssysteme?“

Für eine umfassende Konkretisierung von cyber-physischen Produktionssystemen in dieser Arbeit, werden, dem Konkretisierungsansatz KA3 aus *Kapitel 3.3* folgend, Charakteristiken zur Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme identifiziert. Dabei wird, über bestehende Arbeiten hinaus, die Produktion gesamtheitlich betrachtet und eine domänenspezifische Sichtweise vermieden. Die *Forschungsfrage FF2* adressiert daher die Identifizierung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.

Forschungsfrage FF2:

„Wie sind cyber-physische Produktionssysteme zu charakterisieren?“

An die *Forschungsfrage FF2* anknüpfend ist zu untersuchen, ob die identifizierten Charakteristiken innerhalb eines virtuellen Inbetriebnahme-Prozesses berücksichtigt werden können. Ein grundlegendes Entscheidungskriterium über diese Eignung kann die Identifizierung des Einflusses der Charakteristiken auf die virtuelle Inbetriebnahme sein. Diesem Ansatz folgend, wird die *Forschungsfrage FF3* formuliert.

Forschungsfrage FF3:

„Welche der cyber-physischen Produktionssystem beschreibenden Charakteristika aus FF2 haben einen Einfluss auf die virtuelle Inbetriebnahme?“

Im Anschluss an die *Forschungsfrage FF3* ist zu untersuchen, wie eine Prozedur zu gestalten ist, die eine lösungsneutrale Berücksichtigung der Charakteristiken mit Einfluss auf die virtuelle Inbetriebnahme auch projekt- und anwendungsübergreifend erlaubt. Die Möglichkeiten einer schrittweisen Prozedur als lösungsneutrale Vorgehensbeschreibung sind innerhalb der *Forschungsfrage FF4* zu beantworten.

Forschungsfrage FF4:

„Wie können die identifizierten Charakteristika aus FF3 innerhalb des Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden?“

Für eine Kombination der Charakteristiken ist eine Organisation zu erarbeiten. Entsprechend der vorgeschlagenen Einordnung von Vorgehensweisen und Methoden in *Kapitel 2.1* wird die Möglichkeit einer Organisation der Charakteristiken in Vorgehensweisen oder Methoden in einem übergeordneten Rahmenwerk zur Beantwortung der *Forschungsfrage FF5* untersucht.

Forschungsfrage FF5:

„Wie gestaltet sich ein Rahmenwerk, das die identifizierten Charakteristiken von FF4 organisiert und Charakteristik-Kombinationen in der virtuellen Inbetriebnahme ermöglicht?“

4.4 Bewertung diskutierter Arbeiten und Ansätze

Mit den erarbeiteten und für diese Arbeit geltenden Forschungsfragen werden nachfolgend die diskutierten Arbeiten und Ansätze aus dem Stand der Technik in Forschung und Industrie erneut betrachtet. Das Ziel ist eine Bewertung der Erfüllung der definierten Forschungsfragen innerhalb der diskutierten Arbeiten und Ansätze. Diese Bewertung ist in *Tabelle 4.4-1* umgesetzt.

Tabelle 4.4-1. Bewertung diskutierter Arbeiten und Ansätze in Bezug auf die Erfüllung der Forschungsfragen.

Arbeiten und Ansätze	Bewertung im Bezug auf die Forschungsfragen				
	FF1	FF2	FF3	FF4	FF5
Novak et al., 2017					
Stark et al., 2017					
Glatt & Aurich, 2019					
Brandstetter & Wehrstedt, 2018					
Brandstetter et al., 2018					
Weyer et al., 2016					
Meyer et al., 2018					
Zeman et al., 2016					



Nicht
erfüllt



Wenig
erfüllt



Teilweise
erfüllt



Größtenteils
erfüllt



Vollständig
erfüllt

In die Bewertung werden ausschließlich die Arbeiten und Ansätze des *Kapitels 3.4* einbezogen, da diese Arbeiten eine kombinierte Themenbetrachtung von cyber-physischen Produktionssystemen und der virtuellen Inbetriebnahme vornehmen. Eine zusätzliche Betrachtung der Arbeiten, die diese Themengebiete isoliert betrachten, kann demnach auch nur zu einer Teilerfüllung der Forschungsfragen führen. Im Ergebnis der Bewertung zeigt sich, dass ein Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme für cyber-physische Produktionssysteme zwar punktuell diskutiert wird, eine tiefere Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme und deren Integration in den virtuellen Inbetriebnahme-Prozess jedoch oft nicht Bestandteil der übergeordneten Zielstellungen ist.

4.5 Abgrenzung dieser Arbeit

Den Kern dieser Arbeit bildet die Untersuchung von Möglichkeiten zur virtuellen Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen. Die virtuelle Inbetriebnahme ist ein in der Anlagenentstehung verorteter Prozess. Damit werden in dieser Arbeit die Phasen der Produktionsentstehung stärker fokussiert als die, im Produktionslebenszyklus nachgelagerten, Phasen, wie beispielsweise der Betrieb, die Wartung und Instandhaltung sowie die Weiterverwertung der betrachteten Produktionssysteme. Gleichzeitig fokussiert die Arbeit den Aspekt der virtuellen, also simulationsgestützten, Validierung von Produktionsanlagen. Eine zusätzliche Validierung anhand realer industrieller Produktionen ist, auch aufgrund des dadurch entstehenden inhaltlichen Umfangs, nicht Bestandteil dieser Arbeit. Die grundsätzliche Möglichkeit der Weiterverwendung der, in der Produktionsentstehung entwickelten, Anlagenmodelle ist dadurch jedoch nicht ausgeschlossen. Cyber-physische Produktionssysteme werden in dieser Arbeit aus der Perspektive des, in *Kapitel 3.3.3* definierten, Konkretisierungsansatz KA3 heraus betrachtet. Neben dieser Perspektive existieren weitere Perspektiven und Konkretisierungsansätze, durch die cyber-physische Produktionssysteme beschrieben werden können. Diese Perspektiven sind jedoch kein zentraler Bestandteil dieser Arbeit und werden daher nur punktuell Verwendung finden. Aufgrund des gewählten Konkretisierungsansatzes und dem Aspekt der virtuellen Validierung, wird eine industrielle Umsetzung in dieser Arbeit nicht angestrebt. Vielmehr sollen die angestrebten Ziele in dieser Arbeit aus einer wissenschaftlichen Perspektive heraus lösungsneutrale Vorgehen vorschlagen und beschreiben, wie der etablierte Prozess der virtuellen Inbetriebnahme dazu beitragen kann, die industrielle Einführung cyber-physische Produktionssysteme zu begünstigen.

5 Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme

Kapitel fünf identifiziert zunächst die in der wissenschaftlichen Literatur diskutierten Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme. Daran anknüpfend werden Definitionen und eine Klassifizierung der identifizierten Charakteristiken vorgeschlagen, bevor die Charakteristiken hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die virtuelle Inbetriebnahme untersucht werden.

5.1 Identifizierung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme

In diesem Kapitel werden wesentliche Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme in der wissenschaftlichen Literatur identifiziert. Dazu werden, über die im Stand der Technik in Forschung und Industrie (*Kapitel 3*) betrachteten Arbeiten hinaus, weitere Arbeiten und Ansätze herangezogen, um die bisherigen Erkenntnisse einerseits zu festigen und andererseits eine umfassendere Betrachtung sicherzustellen.

5.1.1 Literaturauswahl

Die bereits im Stand der Technik in Forschung und Industrie (*Kapitel 3*) vorgestellten Arbeiten und Ansätze werden durch eine weitere Betrachtung von Arbeiten und Ansätzen aus der wissenschaftlichen Literatur ergänzt.

Die Grundlage für eine erweiterte Betrachtung bilden die Ergebnisse einer Recherche nach Arbeiten und Ansätzen, deren wesentlicher inhaltlicher Fokus auf cyber-physische Produktionssysteme gesetzt ist. Diese Ansätze und Arbeiten werden aus wissenschaftlichen Online-Literaturdatenbanken wie Science Direct, Web of Science, IEEE-Xplore, Research Gate und der Suchmaschine für wissenschaftliche Dokumente Google Scholar herangezogen (*Elsevier B.V., o. D.; Clarivate Analytics, o. D.; IEEE, o. D.; ResearchGate GmbH, o. D.; Google LLC, o. D.*).

Als wesentlicher Suchbegriff innerhalb dieser Literaturdatenbanken wird „*cyber physical production*“ in einem Zeitraum vom 01.01.2006 bis 01.07.2021 genutzt. Es werden die jeweiligen ersten 100 Dokumente in den Datenbanken betrachtet, wobei die datenbankinterne Sortierung nach Relevanz der Dokumente entscheidend für deren Ergebnisplatzierung ist. Da die Recherche

in verschiedenen Literaturdatenbanken durchgeführt wird, besteht die Möglichkeit, identische Arbeiten zu identifizieren. Daher werden in einem weiteren Schritt identische Arbeiten ausgesondert. Darüber hinaus werden ausschließlich Arbeiten, die öffentlich oder über einen Hochschulzugang verfügbar sind, berücksichtigt. Der Literaturauswahlprozess ist als Flussmodell in *Abbildung 5.1-1* dargestellt.

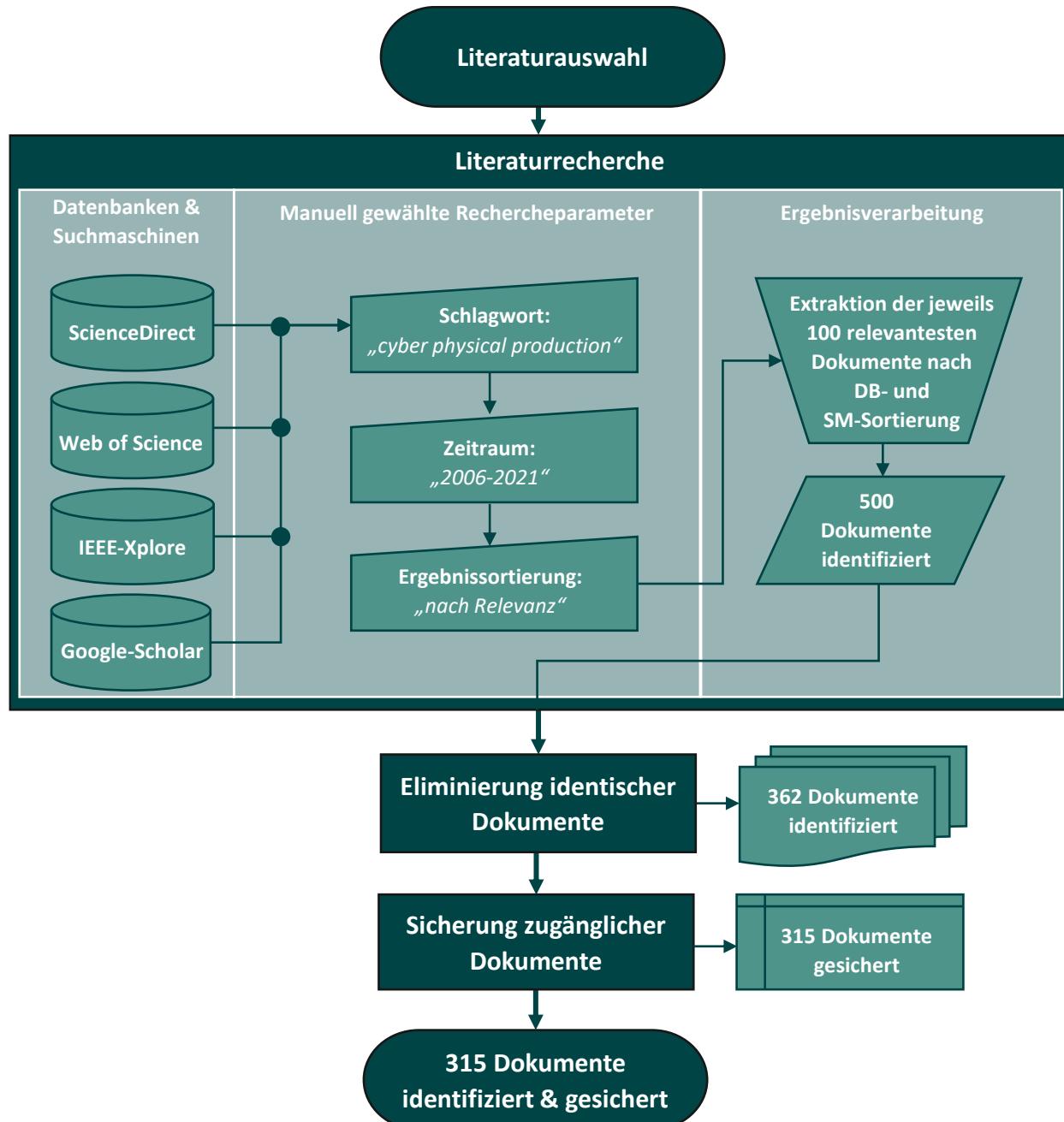


Abbildung 5.1-1. Flussdiagramm des Literaturauswahlprozesses zur Bestimmung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme nach (DIN 66001:1983-12).

5.1.2 Restriktionen und spezifizierte Literaturanalyse

Im Stand der Technik (*Kapitel 3*) konnten innerhalb der betrachteten Arbeiten und Ansätze eine Vielzahl an Charakteristiken zur Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme identifiziert werden. Wie bereits in den Defiziten und in dem Handlungsbedarf (*Kapitel 4*) erläutert, besteht die Möglichkeit, dass bei einer übergreifenden Betrachtung der Arbeiten und Ansätze mehrere Charakteristiken, durch gleiche inhaltliche Aspekte beschrieben und somit synonym verwendet werden. Daher werden synonym gebrauchte Charakteristiken zwar unter einem Begriff, also einer Charakteristik, zusammengefasst, jedoch werden auch die in der untersuchten Literatur gebrauchten Synonyme konkretisiert.

Weitere Restriktionen bei der Betrachtung der, in den jeweiligen Arbeiten und Ansätzen diskutierten, Charakteristiken ergeben sich durch die in *Kapitel 4.5* getroffenen Themenabgrenzungen in dieser Arbeit. Das Ziel ist es, die Charakteristiken, die stellvertretend als systematische Merkmale zur Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme stehen, innerhalb des Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme zu berücksichtigen. Diese Arbeit verfolgt darüber hinaus keine echtzeitfähige Umsetzung der virtuellen Inbetriebnahme, weshalb die Echtzeitfähigkeit von cyber-physischen Produktionssystemen in dieser Arbeit nicht berücksichtigt wird. Ferner werden nicht numerisch verifizierbare und validierbare Charakteristiken in der weiteren Betrachtung dieser Arbeit vernachlässigt. Als konkrete Beispiele sind hierfür die Intelligenz und die Transparenz cyber-physischer Produktionssysteme anzuführen. Während der Begriff Intelligenz, auch aufgrund fehlender Kennzahlen zum Zeitpunkt der Ausarbeitung dieser Arbeit, keine numerische oder normative Verifizierung ermöglicht, bedeutet Transparenz in dieser Arbeit die Sicherstellung der Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit von, in der Produktionsplanung getroffenen, Entscheidungen seitens der Belegschaft und ist damit mehr dem Wissensmanagement als der industriellen Produktion zuzuordnen.

Die Betrachtung der Arbeiten und Ansätze im Stand der Technik und die darin identifizierten Charakteristiken werden nachfolgend durch eine erweiterte Analyse wissenschaftlicher Literatur entsprechend dem Literaturauswahlprozess von *Abbildung 5.1-1* ergänzt. Ein Ausschnitt dieser spezifizierten Literaturanalyse ist der Literatur aus dem Stand der Technik in *Tabelle 5.1-1* gegenübergestellt. Das vollständige Ergebnis der spezifizierten Literaturanalyse ist dem *Anhang 5.1* zu entnehmen.

Tabelle 5.1-1. Spezifizierte Literaturanalyse.

Literatur aus dem Stand der Technik	Σ Spezifizierte Literaturanalyse (Ausschnitt: 17 / 316 Arbeiten)	Σ Identifizierte Erwähnungen																
		Adaptivität	Agilität	Dezentralisierung	Flexibilität	Integrierbarkeit	Interoperabilität	Kompatibilität	Mobilität	Modularität	Rekonfigurierbarkeit	Robustheit	Skalierbarkeit	Umrüstbarkeit	Veränderungsfähigkeit	Wandlungsfähigkeit	Σ Ident. Charakteristiken	
Salazar et al., 2019	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	
Dafflon et al., 2018	●		●	●		●	●		●	●	●		●		●		●	
Berger et al., 2021	●	●	●	●				●	●		●	●		●	●			
Tonelli et al., 2021	●		●	●	●	●	●		●	●			●		●			
Monostori et al., 2016	●	●	●	●		●						●					●	
Ma et al., 2021	●		●	●		●				●	●	●						
Bayanifar & Kühnle, 2017			●			●				●	●	●	●			●	●	
Weyrich et al., 2017		●	●	●							●	●				●	●	
Karnouskos et al., 2019	●		●	●	●	●	●		●					●				
Ribeiro & Hochwallner, 2018	●				●	●	●	●	●	●	●			●				
Hehenberger et al., 2016	●		●	●		●				●	●							
Huang et al., 2021			●	●					●	●			●					
Wu et al., 2020	●		●	●		●					●	●	●					
Bayhan et al., 2020			●	●						●	●	●						
Cardin, 2019	●	●	●				●				●					●		
Kannengiesser et al., 2020	●	●	●	●		●					●							
Yu et al. 2017	●	●	●	●									●		●			
Weyer et al., 2016	●	●	●	●		●				●	●		●					
Huber, 2016	●		●	●	●		●			●		●						
Amra et al., 2017	●		●	●							●	●						
Meixner et al., 2020	●			●							●							
Schuhmacher & Hummel, 2016				●		●	●				●	●	●			●	●	
Ribeiro, 2017	●				●	●				●	●		●			●		
Michniewicz & Reinhart, 2014					●						●	●						
Francalanza et al., 2017	●		●	●							●	●				●		
Heisig, 2016	●		●	●	●		●											
Theiss, 2015			●	●						●		●						
Hammerstingl, 2020	●				●		●		●		●							

5.1.3 Ergebnisdiskussion der spezifizierten Literaturanalyse

Innerhalb der spezifizierten Literaturanalyse wurde ein Großteil der bereits im Stand der Technik identifizierten Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme bestätigt. Darüber hinaus ergaben sich neu identifizierte und im Stand der Technik bisher nicht diskutierte Charakteristiken. Hierunter fallen die Kompatibilität, die Mobilität und die Umrüstbarkeit von Produktionssystemen. Kapitelübergreifend werden cyber-physische Produktionssysteme meistens durch Adaptivität, Dezentralisierung und Flexibilität charakterisiert. Dieses Ergebnis wird auch in der Gesamtübersicht aller 316 analysierten Dokumente im Anhang 5.1 bestätigt. Weitere häufig identifizierte Charakteristiken beschreiben die Interoperabilität, die Modularität und die Rekonfigurierbarkeit sowie die Robustheit und die Wandlungsfähigkeit von cyber-physischen Produktionssystemen.

Erneut wird, wie bereits im *Kapitel 4* beschrieben, deutlich, dass die Charakteristiken innerhalb der Arbeiten unterschiedlich definiert sind. Ferner besteht eine undeutliche Abgrenzung der wesentlichen inhaltlichen Aspekte der Charakteristiken, die jedoch entscheidend für die Formulierung einer Definition sind. Darüber hinaus stellte die Literaturanalyse heraus, dass Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken definiert werden können. Hierdurch wurden die Neutralität und die Universalität auch als grundlegende Charakteristiken für die Wandlungsfähigkeit oder auch die Modularität identifiziert, wobei die Modularität wiederum auch als ein Treiber der Wandlungsfähigkeit gilt (*Nyhuis et al., 2008, S. 27; Steegmüller & Zürn 2017, S.28*). Eine erneute Analyse der wissenschaftlichen Literatur wurde daraufhin durchgeführt. Im Ergebnis dieser Analyse kann literaturübergreifend zwar dieselbe Abhängigkeit identifiziert werden, einen direkten Bezug zu cyber-physischen Produktionssystemen weisen diese Charakteristiken jedoch nicht explizit in der untersuchten Literatur auf.

Die Abhängigkeiten zwischen allen identifizierten Charakteristiken werden nachfolgend im Kapitel Klassifizierung näher betrachtet. Die Grundlage für die Formulierung der Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken bilden ihre Definitionen. Daher werden im nachfolgenden *Kapitel 5.2* Definitionen vorgeschlagen, die in der Gesamtbetrachtung der identifizierten Charakteristiken entstanden und für deren inhaltliches Verständnis in dieser Arbeit maßgeblich sind.

5.2 Definition und Konkretisierung der Charakteristiken

Die Formulierung der Definitionen verfolgt zunächst die Ziele einer Konkretisierung und daran anknüpfend eine eindeutige Abgrenzung zwischen den Produktionscharakteristiken zu schaffen. Im Verlauf der jeweiligen Definitionsbildung werden Synonyme dargelegt und eine Übersetzung in die englische Sprache vorgeschlagen. Die Definitionen und Konkretisierungen der Charakteristiken werden in alphabetischer Reihenfolge diskutiert.

5.2.1 Adaptivität

Die Adaptivität eines Systems beschreibt dessen Fähigkeit, sich durch, in der Planungsphase, definierte Randbedingungen teilweise selbstständig an die Umgebungsbedingungen anzupassen zu können und bildet, aufgrund der vielschichtigen Verwendungsmöglichkeiten, einen übergeordneten Begriff der Produktionseigenschaften. Aufgrund der Etymologie des lateinischen Begriffs „*adaptare*“, welcher sinngemäß mit anpassen ins Deutsche zu übersetzen ist, ist der Begriff „Anpassungsfähigkeit“ synonym zur Adaptivität zu verwenden.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: adaptivity, adjustability
- Synonyme: Anpassungsfähigkeit

5.2.2 Agilität

Die Agilität beschreibt die Fähigkeit eines Unternehmens, proaktiv Entscheidungen zur Ausrichtung der Produktion, im Hinblick auf Methoden und Prozesse, zu fällen, um auf wirtschaftliche Turbulenzen wie Marktveränderungen zu reagieren und die Geschäftsfelder des Unternehmens anzulegen zu können. Ist ein Unternehmen dazu in der Lage, entsprechend der Marktveränderungen bestehende Geschäftsfelder anzulegen oder neue Geschäftsfelder zu erschließen, gilt das Unternehmen als agil.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: agility
- Synonyme: keine

5.2.3 Dezentralität

Die Dezentralität beschreibt eine standortunabhängige Verteiltheit von prozesssteuernden Elementen oder die Nutzung prozessbeschreibender Produktbearbeitungsinformationen innerhalb der Produktion zur Beeinflussung von Betriebsmitteln.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: decentrality; de-centrality
- Synonyme: Verteiltheit

5.2.4 Flexibilität

Die Flexibilität besitzt in der wissenschaftlichen Literatur viele Definitionen mit inhaltlich unterschiedlichen Konkretisierungen der wesentlichen Aspekte einer flexiblen Produktion. Daher wird für die Flexibilität eine umfassendere Betrachtung bestehender Definitionen unternommen und darauf aufbauend eine Definition der Flexibilität, die für diese Arbeit gilt, erarbeitet.

In der wissenschaftlichen Literatur existieren auch aufgrund der verschiedenen Perspektiven der betrachteten Arbeiten unterschiedliche Definitionen einer flexiblen Produktion. Der wesentliche Konsens besteht darin, dass mit der Einführung einer erhöhten Flexibilität der Produktion auf Störeinflüsse reagiert wird. Die Störeinflüsse umfassen dabei wechselnde Anforderungen der Märkte sowie sich ändernde Produktionsvolumen und Produkte (*Wattenberg et al., 2020, S. 160; ElMaraghy, 2005, S. 261*). In (*Sethi & Sethi, 1990, S. 298-313*) wurden elf Dimensionen der Flexibilität in der produzierenden Industrie identifiziert, die durch Arbeiten beispielsweise von (*Vokurka & O'Leary-Kelly, 2000, S. 485-501; Gupta & Somers, 1992, S. 205; Parthasarthy & Sethi, 1993, S. 530; Slack, 1987, S. 35-45*) um vier weitere Dimensionen ergänzt wurden. Aus dieser Dimensionssammlung sind die Produktions- und Prozessflexibilität im Kontext der präzisierten Zielstellung dieser Arbeit von wesentlichem Interesse. Das Verständnis der Dimensionen wird zunächst kurz erläutert. Im Anschluss daran werden diese Dimensionen die Betrachtungsgrundlage zur Untersuchung bestehender Definitionen der Flexibilität einer Produktion aus Sicht der Forschung und Industrie bilden. Die Dimension der Produktionsflexibilität bezeichnet nach (*Sethi & Sethi, 1990, S. 311*) die Menge an Teiletypen, die ein Fertigungssystem ohne das Hinzufügen größerer Investitionsgüter produzieren kann. Damit schließen die Autoren eine grundsätzliche Möglichkeit der Umrüstung der betrachteten Fertigungssysteme nicht aus. Sie knüpfen die Umrüstungsmöglichkeit jedoch an die zusätzlich

aufzuwenden finanziellen Mittel. Die Höhe der Ausgaben beziffern die Autoren zwar nicht, jedoch beschreiben sie, dass es sich bei den Umrüstungen um technische Ressourcen mit einem geringen Umrüstungsaufwand, also beispielsweise um die Werkzeuge der Ressourcen handelt.

Im Kontext dieser Arbeit wird aus einer verallgemeinernden Perspektive der Produktion eine *Definition D5.2-1*, entsprechend der Ansichten nach (*Sethi & Sethi, 1990, S. 311*), in einer breiteren Sichtweise formuliert, die ein, in der Produktionsplanung und -entwicklung berücksichtigtes, nachträgliches Umrüsten technischer Ressourcen beinhaltet.

Definition D5.2-1:

Die **Produktionsflexibilität** beschreibt die zum Zeitpunkt der Produktionsplanung und -entwicklung betrachtete Menge an Produkten oder Produktkomponenten, die das betrachtete System herstellen kann.

In (*Sethi & Sethi, 1990, S. 302*) bezieht sich die Dimension der Prozessflexibilität eines Fertigungssystems auf die Menge der Teiletypen, die das System ohne größere Umrüstungen produzieren kann. Dem Ansatz dieser Definition folgt diese Arbeit und schlägt eine abgewandelte *Definition D5.1-2* mit einem deutlicheren Fokus auf Bedeutung der Prozesse vor.

Definition D5.2-2:

Die **Prozessflexibilität** umfasst die Menge an durchführbaren Aufgaben, die das betrachtete System ohne Umrüstungen durch die Ausführung der in der Planungsphase festgelegten Systemfunktionalität herstellen kann.

Die Definitionen der Produktions- und Prozessflexibilität sind durch die herzustellenden Produkte eng miteinander verknüpft. Zwar werden die Definitionen der Dimensionen in dieser Arbeit ohne die Möglichkeit ein nachträgliches, nicht in der Produktionsplanung und -entwicklung berücksichtigtes, Umrüsten formuliert, jedoch existieren hierzu in der wissenschaftlichen Literatur und in den Ansichten der Industrie unterschiedliche Auffassungen, die nachfolgend vorgestellt werden.

In einer verallgemeinerten Sichtweise kann die Flexibilität von Systemen nach (*Toni & Tonchia, 1998, S. 1589*) als ein Merkmal der Schnittstelle zwischen dem betrachteten System und seiner externen Umgebung eingeordnet werden (*Correa 1994, S. 41-42, 212*). Als eine Art Filter schützt die Flexibilität vor externen Störungen in Form von Unsicherheiten, die durch Messungen, Häufigkeit, Neuheit und Sicherheit erfasst und bemessen werden (*Toni & Tonchia, 1998, S. 1589*).

Aus Sicht der Fertigungstechnik beschreibt die Flexibilität eines Systems nach (*Toni und Tonchia, 1998; ElMaraghy, 2005, S. 262*) die Auslegung einer Fertigung auf, zum Zeitpunkt der Planung bekannte, Produkte und erwartbare Produktvariationen zukünftig herzustellender Produkte. Damit basiert das Ausmaß oder die Höhe der Flexibilität häufig auf Erfahrungswerten der Produktionsplaner aus vergangenen Produktionsprojektplanungen. Dieser Ansicht folgt (*Zäh et al., 2005, S. 4*) und verdeutlicht, dass die Flexibilität einer Fertigung ausschließlich die Betriebszustände umfasst, die das System entsprechend der in der Entwurfsphase vordefinierten Spezifikation erreichen kann, ohne eine Änderung am System selbst zu erfahren.

Den vorangegangenen Definitionen ist damit gemeinsam, dass die Flexibilität bei äußeren Störungen sicherstellt, dass das System, innerhalb festgelegter Handlungskorridore, in der Lage ist, die Produktion fortzuführen, ohne dass ein Bedarf einer Änderung am System selbst besteht. Dem steht die Einordnung nach (*Wiendahl, 2002a, S. 127*) gegenüber, in der die Flexibilität als Bestandteil der Veränderungsfähigkeit definiert und in diesem Kontext sowohl die Möglichkeit einer Änderung von physischen (Hardware) als auch logischen Komponenten (Software) mit einem entsprechenden Arbeitsaufwand berücksichtigt wird. In einer jüngeren Definition der Flexibilität beschränken sich diese Änderungen wiederum alleine auf logische Änderungen beispielsweise in Form von Anpassungen der Steuerungscodes der verwendeten technischen Ressourcen, Materialflussumleitungen oder auch Abwandlungen des Arbeitsplans (*Michniewicz, 2019, S. 22*).

Die produzierende Industrie hat ebenfalls unterschiedliche Sichtweisen auf die Flexibilität ihrer Produktionssysteme. Während die Flexibilität im Mercedes-Benz Werk in Sindelfingen im Bereich des Rohbaus als Eigenschaft mit physischen und logischen Änderungsmöglichkeiten der Ressourcen beschrieben wird (*Wattenberg et al., 2020, S. 161*), lässt eine Veröffentlichung mit Bezug zur BMW-AG nicht auf die Notwendigkeit physischer Anpassungen der verwendeten technischen Ressourcen schließen.

In der Arbeit von (*Wocker et al., 2020, S. 1026*) werden physische Anpassungen der betrachteten Ressourcen durch einen automatisierten Werkzeugwechsel realisiert, wodurch die Produktion selbst nicht durch einen zu planenden Aufwand im Sinne eines Personaleinsatzes unterbrochen wird und die physische Änderung Teil der Flexibilität der Produktion wird.

Der Einblick in die Definitionslandschaft der produktionsseitigen Flexibilität lässt eine Vielzahl an Unterschieden erkennen, die nicht zuletzt auf die individuellen Anwendungsszenarien zurückzuführen sind. Gleichzeitig bestehen grundlegende Gemeinsamkeiten in allen Definitionen mit wissenschaftlichem oder industriellem Hintergrund.

Zum einen besteht ein einheitliches Verständnis darüber, dass Flexibilität in der Produktion die Möglichkeit zur Herstellung verschiedener Produkte unter Verwendung derselben in der Planung festgelegten Ressourcen bedeutet. Zum anderen kann der Umfang der benötigten Ressourcen variieren, indem weitere Ressourcen für nachfolgende Produktfamilien vorgehalten werden. Die Funktionalität der verwendeten und vorgehaltenen Ressourcen spannt dann einen Bereich möglich durchzuführender Prozesse auf. Dieser aufgespannte Bereich wird in der Literatur auch als Flexibilitätsfenster oder -korridor bezeichnet. Die Art und Weise, wie vorgehaltene Ressourcen in den Betrieb eingebunden werden können, entscheidet dann über die Art und den Aufwand der Änderung.

In der *Definition D5.2-1* ist der Aspekt der Umrüstung bereits ein fester Bestandteil der Formulierung. Jedoch sind keine weiteren Ausführungen zur Art der nachträglichen Änderungen dargelegt worden. In dieser Arbeit werden logische Änderungen an den Produktionsressourcen nach der Produktionsentwicklung in dem Verständnis einer flexiblen Produktion berücksichtigt. Damit folgt diese Arbeit dem Großteil der in diesem Kapitel betrachteten Arbeiten aus Wissenschaft und Industrie, die sich lediglich für eine nachträgliche logische Änderung der Ressourcen in ihren Definitionen entscheiden.

Ein weiterer wesentlicher Grund für diese Entscheidung ist, dass nachträgliche physische Änderungen der verwendeten Ressourcen neue Funktionalitäten der Ressourcen begünstigen, wodurch die Abgrenzung der Flexibilität gegenüber der Rekonfigurierbarkeit undeutlich wird.

Auf dieser Basis wird die Formulierung der Definition der Produktionsflexibilität nachfolgend weiter präzisiert und in *Tabelle 5.2-1* den in diesem Kapitel betrachteten Arbeiten aus Wissenschaft und Industrie gegenübergestellt.

Definition D5.2-3: (präzisiert D5.2-1)

Die **Flexibilität**, engl. *flexibility*, beschreibt die Fähigkeit von Produktionssystemen die, zum Zeitpunkt der Produktionsplanung und -entwicklung, betrachtete Menge an Produkten oder Produktkomponenten, ohne die Notwendigkeit physischer Änderungen der Produktionsressourcen, herstellen zu können (vgl. *Tabelle 5.2-1*).

Tabelle 5.2-1. Definitionen der Flexibilität (F) in Bezug zur Produktionssystemänderung nach der Produktionsentwicklungsphase.

Betrachtete Arbeiten	Änderungen (F) berücksichtigt keine Änderungen	(F) berücksichtigt logische Änderungen	(F) berücksichtigt physische Änderungen
(Zäh et al., 2005, S. 4)	X		
(Wiendahl, 2002a, S. 127)		X	X
(Michniewicz, 2019, S. 22)		X	
(Wattenberg et al., 2020, S. 161)		X	X
(Wocker et al., 2020, S. 1026)		X	
Diese Arbeit		X	

5.2.5 Integrierbarkeit

Die Integrierbarkeit von Systemen beschreibt die Fähigkeit, bisher nicht verwendete Objekte im Gesamten oder in Teilen in bestehende Systemstrukturen aufzunehmen und die Prozessstruktur

entsprechend der Anforderungen und durch zusätzliche Funktionen zu ändern. Voraussetzung dafür ist eine physische oder logische Schnittstelle, die im ersten Schritt eine Anbindung in Form einer Schnittstelle zwischen bisher verwendeten und zu integrierenden Systemen anbietet und im zweiten Schritt eine Einbindung des neuen Systems in den bestehenden System-Prozessablauf sicherstellen kann.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: integrability
- Synonyme: keine

5.2.6 Interoperabilität

Die Interoperabilität beschreibt die Fähigkeit von Systemen, Funktionsdaten mit anderen Systemen oder Elementen in der Produktion in einem konsistenten gemeinsamen inhaltlichen Verständnis auszutauschen und zur Erfüllung des übergeordneten Produktionsziels zu verwenden. Dadurch entsteht eine gegenseitige Beeinflussung in Beziehung stehender Systeme, weshalb Interoperabilität synonym zur Interaktionsfähigkeit zu verwenden ist.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: interoperability
- Synonyme: Interaktionsfähigkeit

5.2.7 Kompatibilität

Die Kompatibilität von Systemen beschreibt die komponentenbasierte Gleichwertigkeit von Systemen und Elementen in Teilen oder im Gesamten zur Vereinbarkeit mittels physischer und logischer Verbindungsstellen zwischen den betrachteten Systemen oder Elementen.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: compatibility
- Synonyme: Keine

5.2.8 Mobilität

Die Mobilität beschreibt die Bewegungsfreiheit von Systemen und Elementen in der Produktion. Ein Maß für die Systemmobilität kann das Vermögen und der Aufwand standortbezogene

Veränderungen zu erfahren sein, um die Lokalität, ausgehend von der aktuellen Position in der Produktion in eine andere, zu verändern.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: mobility
- Synonyme: Versetzbartigkeit

5.2.9 Modularität

Die Modularität von Systemen beschreibt den Zusammenschluss von Objekten zu einheitlichen übergeordneten Objektgruppen, die innerhalb der Gruppen eigenständige Aufgaben übernehmen, sich in die ihnen übergeordnete gesamte Produktion einordnen und einen aufwandsarmen und kostengünstigen Austausch erlauben.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: modularity
- Synonyme: Keine

5.2.10 Neutralität

Die **Neutralität** beschreibt die Fähigkeit von Systemen, offen und wertfrei mit anderen Systemen oder Elementen der Produktion zu interagieren, ohne Bedarf an zusätzlichen Anforderungen oder technischen Voraussetzungen.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: neutrality
- Synonyme: keine

5.2.11 Rekonfigurierbarkeit

Die Rekonfigurierbarkeit ist die Fähigkeit eines Systems seinen Zustand, ausgehend von einer Maschinenkonfiguration, durch eine aufwandsarme physische Austauschbarkeit oder logische Änderung von Systemkomponenten, in eine andere Maschinenkonfiguration mit Auswirkungen auf die Systemfunktionalität zu ändern.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: reconfigurability
- Synonyme: keine

5.2.12 Robustheit

Die Robustheit von Systemen ist die Fähigkeit, stabile und zuverlässige Produktionsprozesse durchzuführen und gegenüber äußereren Einflüssen (Turbulenzen) unempfindlich, im Sinne einer hohen Prozessstabilität und Anlagenverfügbarkeit (geringe Ausfallwahrscheinlichkeit), zu sein, ohne dass Änderungen am Produktionssystem selbst vorgenommen werden müssen, die eine Unterbrechung der Prozesse herbeiführen könnten.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: robustness
- Synonyme: Prozessstabilität

5.2.13 Skalierbarkeit

Die Skalierbarkeit ist die Fähigkeit eines Systems, kapazitive Änderungen von natürlichen und technischen Ressourcen, entsprechend der Marktanforderungen, vornehmen zu können. Die numerische Änderung der natürlichen Ressourcen umfasst die Personal- und Schichtplanung, wohingegen die Änderung technischer Ressourcen Betriebsmittel und technische Hilfsgüter adressiert.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: scalability
- Synonyme: keine

5.2.14 Umrüstbarkeit

Die Umrüstbarkeit von Systemen beschreibt die Fähigkeit zur Änderung von Betriebsmittelbestandteilen, wie Werkzeuge zur Anpassung des Systems an Operationsänderungen, wobei die Austauschbarkeit der Bestandteile mit geringem Rüstaufwand angestrebt und die Prozessfunktionalität in allen Arbeitszuständen beibehalten wird.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: changeover-ability; convertibility
- Synonyme: Retrofit

5.2.15 Universalität

Die Universalität beschreibt, in welchem Umfang das betrachtete System in der Lage, trotz veränderter Prozessanforderungen und ohne den aktuellen Arbeitszustand zu verlassen, also ohne Veränderungen an dem Produktionssystem selbst vornehmen zu müssen, weiter zu produzieren.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: universality
- Synonyme: Keine

5.2.16 Veränderungsfähigkeit

Die Veränderungsfähigkeit ist die Fähigkeit eines Unternehmens, die Produktion in seiner Gesamtheit oder in Elementen von einem Zustand in den nächsten Zustand zu überführen, um den marktwirtschaftlichen oder technologischen Anforderungen (Turbulenzen) gerecht zu werden. Dabei ist die Veränderungsfähigkeit eine übergeordnete Charakteristik, die weitere Charakteristiken zur Erreichung der Veränderungsfähigkeit nutzt.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: changeability oder ability to change
- Synonyme: Keine

5.2.17 Wandlungsfähigkeit

Die Wandlungsfähigkeit beschreibt die Möglichkeit von Systemen auf zum Zeitpunkt der Produktionsplanungsphase unbekannte Anforderungen reagieren zu können, indem durch die Verschiebung von vorgehaltenen Handlungskorridoren die Fähigkeiten der Systeme verändert werden, wobei eine Verschiebung stets mit einer physischen Umstrukturierung verbunden ist. Unbekannte Anforderungen können Änderungen im Produktprogramm oder der verwendeten Produktionstechnologie sein. Da es zu keinem Zeitpunkt realisierbar ist, alle zukünftig möglichen Produkte oder Technologien in der Planungsphase berücksichtigen zu können, ist eine Umstrukturierung der Produktionssysteme Voraussetzung.

- Übersetzungsempfehlung in die englische Sprache: versality oder transformability
- Synonyme: Transformierbarkeit

5.3 Klassifizierung

Während der Literaturrecherche und der Analyse der inhaltlichen Aspekte der Charakteristiken zur Beschreibung cyber-physischer Produktionssysteme konnten wiederholt Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken identifiziert werden. Diese Abhängigkeiten führen dazu, dass einige Charakteristiken anderen Charakteristiken über- oder untergeordnet, also klassifiziert, werden können. Daher werden die Möglichkeiten einer Klassifizierung sowie deren Gliederung und die Klassifizierungsdurchführung als zentrale Bestandteile in diesem Kapitel diskutiert.

5.3.1 Klassifizierungssysteme

Klassifizierungssysteme dienen der Einordnung und Gliederung von Elementen nach einheitlichen Bewertungskriterien zu Vergleichszwecken. Die Grundlage für die Bewertung bilden die Bewertungskriterien und die Sicherstellung der Einordnungsbarkeit der Betrachtungselemente. Entsprechend der Komplexität und untersuchten Ausprägungsmenge der Elemente, lassen sich vielseitige Bereiche für die Einsortierung der Elemente definieren. Darüber hinaus ist die Granularität der Untergliederung entscheidend für eine zielführende Klassifizierung. Während eine zu grobgliedrige Einteilung zu einer zu großen Abstraktion der Übergänge zwischen den Einteilungsebenen führt, kann bei einer zu feingliedrigen Einteilung der Klassifizierungsebenen das Risiko einer mehrfachen Einordnungsmöglichkeit der betrachteten Elemente bestehen, wodurch die Klassifizierung selbst uneindeutig werden kann (*Fehr et al., 2012*). Daher werden im nachfolgenden Kapitel bestehende Ansätze für eine Gliederungen der Klassifizierungsebenen untersucht und für einen Einsatz auch in dieser Arbeit diskutiert.

5.3.2 Klassifizierungsgliederung und Klassifizierungsebenen

Diese Arbeit konzentriert sich auf den Bereich der Produktion, den Auswirkungen, die durch cyber-physische Produktionssysteme auf sie wirken und wie diese Auswirkungen innerhalb einer virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden können. Daher werden für die Wahl der Klassifizierungsebenen in dieser Arbeit bereits existierende und in (*Illmer & Vielhaber, 2021*) diskutierte Ansätze dargestellt, um darauf aufbauend Klassifizierungsmöglichkeiten für diese Arbeit heranzuziehen. Das Ergebnis dieser Diskussion ist in *Tabelle 5.3-1* dargestellt.

In einer Hierarchie der Sachsysteme gliedert (*Ropohl, 2009, S. 122*) die Bestandteile einer Produktion in acht Ebenen, ausgehend von der Werkstoffebene bis zur Betrachtung der Anlagen im globalen Verbund. Die Zwischenebenen sind in *Tabelle 5.3-1* dargelegt. In dieser Arbeit ist die Notwendigkeit einer Betrachtung der Werkstoffebene nicht gegeben. Darüber hinaus erscheint eine Unterteilung zwischen Maschine, Gerät und Aggregat entsprechend den Ausführungen von (*Fehr et al., 2012*) zu feingliederig für diese Arbeit.

In (*IEC 62264-1:2013*) werden aus der Perspektive der sechs Ebenen diskutiert, beginnend mit einer Sensorebene und mit der Unternehmensebene endend. Die Gliederung sieht nach der Sensorebene die Feldebene in der Gliederungsreihenfolge vor. Zwar ist die Granularität der Klassifizierung auch für diese Arbeit sinnvoll, jedoch sind die konkreten Inhalte der Feldebene nicht eindeutig gegenüber der nachfolgenden Steuerungsebene und aus Sicht der Ziele in dieser Arbeit zu unterscheiden.

In (*Adolphs et al., 2015*) wird eine Klassifizierungsmöglichkeit aus dem RAMI 4.0 Model, welches im dritten Kapitel vorgestellt wird, für diese Arbeit näher betrachtet. Dabei gliedern die Autoren die Einordnungsmöglichkeiten für Produktionsobjekte in sieben Ebenen und stützen sich dabei auch auf die Gliederung der bereits vorgestellten Norm (*IEC 62264-1:2013*) sowie (*IEC 61512*). Zusätzlich betrachten die Autoren in (*Adolphs et al., 2015*) die Ebene der „connected-world“, also einer vernetzten Welt. Aus der Perspektive der Zielstellung in dieser Arbeit ist die Verwendung einer solchen Ebene jedoch zu umfassend.

Die Autoren in (*Wiendahl et al., 2007*) gliedern die Produktion auch aus Sicht ihrer Veränderungsfähigkeitsklassen in sechs Ebenen. Die Klassifizierungsgliederung berücksichtigt einzelne Arbeitsplätze auf der niedrigsten Ebene und definiert ein Netzwerk der Produktion als höchste Gliederungsebene. Entsprechend der für diese Arbeit gewählten Definitionen der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme ist eine Unternehmensebene für die Einordnung aller betrachteten Charakteristiken erforderlich. In (*Wiendahl et al., 2007*) ist nicht eindeutig identifizierbar, ob die Standortebene auch eine Unternehmensebene darstellen kann.

In (*Lüder et al., 2017*) wird eine Gliederung der Produktion, bestehend aus neun Ebenen, diskutiert. Zwar wird die Gliederung vor dem Hintergrund cyber-physischer Produktionssysteme diskutiert, jedoch ist die Granularität dieser Einordnung, entsprechend den Ausführungen in

(Fehr et al., 2012), zu feingliedrig. Die betrachteten Ansätze zur Klassifizierungsgliederung zeigen, wie technische Objekte innerhalb der Produktion verschiedenen Ebenen zugeordnet werden können, wenngleich die Gliederungsansätze unterschiedliche Granularitäten aufweisen. Für eine Klassifizierung der Charakteristiken in dieser Arbeit wird diesen Ansätzen mit einer Einschränkung in der Definition der Ebenen gefolgt. In (Fehr et al., 2012) wird verdeutlicht, dass die Granularität einer Gliederung entscheidend für eine nachvollziehbare Einordnung der betrachteten Elemente sein kann. Neben der Granularität sind die Definitionen der Ebenen ein zentraler Bestandteil für eine nachvollziehbare Klassifizierungsdurchführung.

Während in den betrachteten Ansätzen Gliederungen mit mindestens acht Ebenen zu einer uneindeutigen Unterscheidung der Ebenen in dieser Arbeit führen können, erscheint ein Ansatz mit fünf Ebenen wiederum zu grobgliedrig. Daher wird in dieser Arbeit eine Gliederung, bestehend aus sechs Ebenen mit einer angepassten Definition der Ebenen, für eine Klassifizierung der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme herangezogen. Die Ebenen werden nachfolgend definiert und gegenüber den diskutierten Ansätzen in *Tabelle 5.3-1* eingeordnet.

Auf der ersten Ebene der Hierarchie befindet sich die Element-Ebene. Die Element-Ebene sammelt Grundelemente technischer Ressourcen in der Produktion. Diese Grundelemente können Gestelle, Grundplatten oder auch Aufnahmen und Flansche darstellen, die eine mechanische Funktion erfüllen. Darüber hinaus werden auch einzelne Sensoren, die als eingebettete Systeme sich wiederholende Funktionen erfüllen, in diese Ebene eingeordnet.

Die zweite Ebene in der Hierarchie ist die Maschinenebene. Auf der Maschinenebene werden technische Systeme betrachtet, die über die Objekte in der Element-Ebene hinaus interdisziplinäre Funktionen erfüllen. Die Objekte der Maschinenebene, sind darüber hinaus in der Lage, Objekte der Element-Ebene zu verwenden, um beispielsweise ihre Umgebung zu erfassen und ergänzend auf sie einzuwirken.

Die dritte Ebene, die Zellenebene, beinhaltet mehrere Objekte der Maschinenebene, die im Verbund mindestens einen Produktionsprozess erfüllen. Sie erfüllen dabei, oft gleichzeitig, mehrere Funktionen innerhalb eines Prozessschrittes.

Die sich an die Zellenebene anschließende vierte Ebene, die Produktionslinien-Ebene, umfasst mehrere Produktionszellen. Dabei können die Produktionszellen durch Einzelarbeitsplätze ergänzt werden. Die Zellen werden durch logistische Transportwege miteinander zu einer Produktionslinie verknüpft.

Die fünfte Ebene, die Fabrikebene oder auch Standortebene, vereint mehrere Produktionslinien und unterliegt regionalen Produktionsanforderungen.

Die sechste Ebene der Klassifizierungsgliederung bildet die Unternehmensebene. Die Unternehmensebene kann mehrere Produktionen, also Fabriken oder Standorte, beinhalten. Daran anknüpfend werden auf Unternehmensebene standortübergreifende Strategien auch im Hinblick auf die Produktion erarbeitet.

Tabelle 5.3-1. Vergleich von Klassifizierungsgliederungen und Klassifizierungsebenen.

Ebene (Ropohl, 2009, S. 122)	Existierende Ansätze für eine Klassifizierungsgliederung			Diese Arbeit (Lüder et al., 2017)
	(IEC 62264-1:2013)	(Adolphs et al., 2015)	(Wiendahl et al., 2007)	
0	-	Vernetzte Welt	-	-
1	Globales Fabriknetzwerk	Unternehmensebene	Netzwerk	Produktionsnetzwerk Unternehmensebene
2	Lokales Fabriknetzwerk	Betriebsleitebene	"Work-Centers" Standortebene	Fabrikebene Fabrik- bzw. Standortebene
3	-	Prozesseitebene	Stationsebene	Produktionslinie Produktionslinie
4	-	Steuerungsebene	Steuerungsebene	Arbeitsbereich bzw. Abteilung Produktionsegment Zellenebene
5	Systemebene	-	-	Zellenebene Arbeitsbereich bzw. Abteilung
6	Aggregatebene	-	-	Arbeitsplatz/ Station Arbeitsplatz
7	Geräteebene	Feldebene	Feldebene	Funktionsgruppe Maschinenebene
8	Baugruppenebene	Sensorebene	Produkt ebene	Komponentenebene Konstruktionselement Element- Ebene
9	Element-Ebene	-	-	-
10	Werkstoffebene	-	-	-

5.3.3 Klassifizierungsbestimmung nach Aspekt 1: Definition

Zur Durchführung der Klassifizierung der 17 identifizierten Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme dient die in *Tabelle 5.3-1* vorgestellte Klassifizierungsgliederung, bestehend aus sechs Ebenen. Die Entscheidungsgrundlage, in welche Ebene eine Charakteristik einzuordnen ist, bilden zwei wesentliche Aspekte. Zum einen existieren innerhalb der, in dieser Arbeit formulierten, Definitionen der Charakteristiken zentrale Anhaltspunkte, die eine Klassifizierung der betrachteten Charakteristik konkretisieren. Zum anderen können Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken in der wissenschaftlichen Literatur identifiziert und ebenfalls für eine Klassifizierung herangezogen werden. Diese Klassifizierungsaspekte werden nachfolgend analysiert. Die Klassifizierung der Charakteristiken folgt dieser Analyse und ist in *Tabelle 5.3-3*, nach Klassifizierungsaspekten geordnet, umgesetzt.

Die Charakteristiken **Adaptivität** und **Agilität** sind innerhalb der Definitionen als übergeordnete Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme eingestuft. Während die Adaptivität technologische Anpassungen der Produktion adressiert, beschreibt die Agilität eine marktorientierte Reaktionsfähigkeit der Unternehmen. Die technologischen Anpassungen und die Sicherstellung der Agilität eines Unternehmens können zudem stark standortgeprägt sein. Dieser Auswirkung folgend, werden die Charakteristiken auf Standortebene eingeordnet, wobei die Adaptivität in Teilen Ausprägungen auch auf Produktionslinienebene aufweist.

Die **Flexibilität** eines Produktionssystems bezieht sich in dieser Arbeit auf eine Produktionslinie und wird maßgeblich durch die Flexibilität der Produktionszellen und Arbeitsbereiche beeinflusst. Diese Aspekte führen zu einer Einordnung der Flexibilität auf Produktionslinienebene mit Ausprägungen auch auf die Zellenebene.

Die **Dezentralität** betrachtet prozesssteuernde Elemente. Die Maschinenebene bildet die erste Ebene, die eine Prozesssteuerung der eingesetzten technischen Ressourcen berücksichtigen kann. Daher wird die Dezentralität auf der Maschinenebene eingeordnet.

Die **Integrierbarkeit** betrachtet die Einbindung zusätzlicher Objekte in bestehende Systemstrukturen. Eine vorhandene Systemstruktur ist dafür maßgeblich, weshalb die Integrierbarkeit auf Zellenebene eingeordnet wird.

Die **Interoperabilität** adressiert die Fähigkeit von Systemen zum Austausch von Funktionsdaten. Die Maschinenebene setzt hierfür eine grundlegende Voraussetzung, indem sie die Kommunikationsfähigkeit zwischen Maschinen und Elementen adressiert. Die Kommunikationsfähigkeit zwischen mehreren Maschinen wird auf der Zellenebene realisiert. Die Interoperabilität wird daher auf Maschinenebene eingeordnet, besitzt jedoch Ausprägungen zur Zellenebene.

Die **Kompatibilität**, die Neutralität und die Universalität von Produktionssystemen adressieren zunächst die in der Produktion eingesetzten Elemente. Daher werden diese Charakteristiken auf Element-Ebene eingeordnet.

Die **Mobilität** kennzeichnet die Bewegungsfreiheit von Elementen und Systemen. Aus Sicht der Produktion wird die Mobilität technischer Ressourcen, also auch Maschinen, entscheidender als die Mobilität einzelner Elemente sein, weshalb die Mobilität auf Maschinenebene mit Ausprägungen zur Element-Ebene eingeordnet wird.

Die **Modularität** wird in dieser Arbeit auf Zellenebene eingeordnet, da der Zusammenschluss von mehreren Elementen und technischen Ressourcen zu übergeordneten Funktionsgruppen auf dieser Ebene maßgeblich sein kann.

Die **Rekonfigurierbarkeit** von Systemen wird zwar auf Maschinenebene realisiert, hat jedoch auf Zellenebene und damit im Verbund mehrerer Systeme die größten Auswirkungen auf die Produktion, weshalb die Rekonfigurierbarkeit auf der Zellenebene mit Ausprägungen auf die Maschinenebene eingeordnet wird.

Die **Robustheit** fokussiert in dieser Arbeit die Prozessstabilität und hat damit eine hohe Anlagenverfügbarkeit zur Folge. Eine Anlage repräsentiert in dieser Arbeit ein aus mehreren technologischen Ressourcen bestehendes System. Aus diesem Grund wird die Robustheit auf Zellenebene eingeordnet und besitzt Ausprägungen sowohl bis zur Produktionslinien- als auch auf die Maschinenebene.

Die **Skalierbarkeit** fokussiert kapazitive Änderungen in der Produktionsausbringungsmenge. Für Änderungen dieser Art, ist eine funktionale Verbundangleichung der eingesetzten Systeme maßgeblich. Daher wird die Skalierbarkeit auf der Zellenebene eingeordnet.

Die **Umrüstbarkeit** beschreibt die Austauschbarkeit von Elementen an Produktionssystemen, wobei zwar grundlegende Parameter, aber keine Systemfunktion verändert werden. Zwar werden die Elemente der Produktionssysteme geändert, die Änderung selbst findet jedoch an den Systemen und Maschinen statt, weshalb die Umrüstbarkeit auf der Maschinenebene eingeordnet wird und Ausprägungen zur Element-Ebene aufweist.

Die **Veränderungsfähigkeit** ist ein übergeordneter Begriff industriell produzierender Unternehmen und wird auf der Unternehmensebene eingeordnet.

Die **Wandlungsfähigkeit** adressiert die Fähigkeit von Systemen auch Änderungen der Produktpalette nach der Produktionsentstehung zu berücksichtigen und herstellen zu können. Dafür ist eine Verbundbetrachtung der Produktionszellen maßgeblich, weshalb die Wandlungsfähigkeit auf der Produktionslinienebene eingeordnet wird.

5.3.4 Klassifizierungsbestimmung nach Aspekt 2: Abhängigkeiten

Neben dem wesentlichen Aspekt, dass aus den Definitionen der Charakteristiken zentrale Anhaltspunkte für eine Klassifizierung der Charakteristiken abgeleitet werden können, bestehen in der wissenschaftlichen Literatur Arbeiten wie auch Ansätze, die Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken identifizieren. Diese Abhängigkeiten werden in diesem Kapitel diskutiert.

In (*Illmer & Vielhaber, 2020; Illmer & Vielhaber, 2021*) werden die Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken diskutiert. Während (*Illmer & Vielhaber, 2020*) noch synonym verwendete Charakteristiken in der Analyse berücksichtigen, werden in (*Illmer & Vielhaber, 2021*) zwar synonym verwendete Charakteristiken eliminiert, die identifizierten Abhängigkeiten jedoch nicht eindeutig für eine Klassifizierung herangezogen. Aus diesem Grund wird die in (*Illmer & Vielhaber, 2020; Illmer & Vielhaber, 2021*) vorgestellte Abhängigkeitsmatrix mit den gewonnenen Erkenntnissen in dieser Arbeit überarbeitet und durch einen Ansatz für eine Klassifizierungsmöglichkeit ergänzt.

Die Abhängigkeitsmatrix gliedert die Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken und unterscheidet dabei zwei Abhängigkeitsformen. Die erste Form beschreibt dabei eine begünstigende Abhängigkeit. Durch diese Abhängigkeit weist eine Charakteristik ein

begünstigendes, also förderliches Merkmal, gegenüber einer anderen Charakteristik auf. Ein Beispiel kann die begünstigende Eigenschaft der Modularität gegenüber der Skalierbarkeit aufweisen, indem die Modularität, durch die Gruppierung und Vereinheitlichung von Funktionseinheiten eine vereinfachte Skalierung der Produktion mit sich wiederholenden Anlagenstrukturen bieten kann.

Die zweite Abhängigkeitsform beschreibt dabei eine befähigende Abhängigkeit zwischen zwei Charakteristiken. Im Gegensatz zur begünstigenden Abhängigkeit stellt die befähigende Abhängigkeit eine Grundvoraussetzung dar, um eine andere Charakteristik erst zu ermöglichen. In der wissenschaftlichen Literatur werden diese Abhängigkeiten zwischen Charakteristiken auch oft als Treiber diskutiert. So definiert (*Wiendahl et al., 2007*) die Modularität, die Skalierbarkeit, die Umrüstbarkeit sowie die Mobilität und weitere als befähigende Charakteristiken für rekonfigurierbare Produktionssysteme. Eine umfassendere Betrachtung der in der wissenschaftlichen Literatur definierten Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken ist tabellarisch in (*Illmer & Vielhaber, 2020*) umgesetzt und befindet sich im *Anhang A5.3*.

In dieser Arbeit werden die Abhängigkeiten, entsprechend der Abhängigkeitsformen und unter Berücksichtigung der Eliminierung von synonym verwendeten Charakteristiken zwischen allen 17 Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme, die in dieser Arbeit diskutiert werden, untersucht. Hierzu wird die Abhängigkeitsmatrix in *Abbildung 5.3-1* herangezogen.

Die Abhängigkeitsmatrix gliedert die 17 Charakteristiken in der zweiten Spalte und der zweiten Zeile und bietet eine Möglichkeit, die Abhängigkeiten zwischen allen Charakteristiken aufzutragen. Dabei stellen die Charakteristiken in der zweiten Spalte beeinflussende Charakteristiken für die Charakteristiken der zweiten Zeile dar. Inwiefern eine Charakteristik in der zweiten Zeile beeinflusst wird, konkretisiert der entsprechende Eintrag in der Matrix. Die Konkretisierung des Eintrags wird durch eine Eins, eine Zwei oder keinen Eintrag verdeutlicht. Eine Eins in der Matrix bedeutet, dass die Charakteristik in der zweiten Spalte begünstigende Merkmale gegenüber der Charakteristik in der zweiten Zeile aufweist. Eine Zwei in der Matrix bedeutet, dass die Charakteristik in der zweiten Spalte befähigende Merkmale gegenüber der Charakteristik in der zweiten Zeile aufweist. Weist der Kreuzungspunkt in der Matrix zwischen zwei Charakteristiken keinen Eintrag auf, konnte in der untersuchten wissenschaftlichen Literatur keine eindeutige Abhängigkeitsform identifiziert werden.

Im zweiten Schritt werden die Einträge der identifizierten Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken zeilen- und spaltenorientiert aufsummiert. So ergibt sich beispielsweise, dass die Adaptivität durch 22 Abhängigkeiten gegenüber anderen Charakteristiken definiert werden kann. Diese 22 Abhängigkeiten teilen sich auf in 16 beeinflussende Charakteristiken und sechs beeinflusste Charakteristiken aus Sicht der Adaptivität.

		Beeinflusste Charakteristiken																	
		Adaptivität	Agilität	Dezentralität	Flexibilität	Integrierbarkeit	Interoperabilität	Kompatibilität	Mobilität	Modularität	Neutralität	Rekonfigurierbarkeit	Robustheit	Skalierbarkeit	Umrüstbarkeit	Universalität	Veränderungsfähigkeit	Wandlungsfähigkeit	
Beeinflussende Charakteristiken	Adaptivität	○	○	○	2	○	○	○	○	○	○	○	1	○	○	○	2	1	6
	Agilität	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1	○	○	○	2	○	4
	Dezentralität	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1	1	○	○	○	1	3
	Flexibilität	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	2	1	○	○	2	2	8
	Integrierbarkeit	1	1	○	○	○	○	○	○	1	○	2	○	1	○	○	1	2	9
	Interoperabilität	1	○	2	1	1	○	○	○	○	○	1	1	○	○	○	○	1	8
	Kompatibilität	1	○	○	○	○	2	2	○	○	2	○	2	1	2	○	1	2	15
	Mobilität	1	○	○	○	1	○	○	○	○	2	○	○	○	○	○	○	2	6
	Modularität	1	○	○	○	1	○	○	1	○	2	1	1	○	○	○	1	2	10
	Neutralität	1	1	1	○	1	1	2	2	2	2	○	2	1	2	1	1	1	20
	Rekonfigurierbarkeit	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1	○	○	○	2	2	7
	Robustheit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	0	0
	Skalierbarkeit	1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	2	1	○	○	○	2	2	9
	Umrüstbarkeit	2	○	○	○	1	○	○	○	○	2	2	○	○	○	○	2	2	11
	Universalität	1	1	1	○	1	1	2	○	1	○	2	○	1	1	○	1	2	15
	Veränderungsfähigkeit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1	○	○	○	○	1	1
	Wandlungsfähigkeit	2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1	○	○	○	2	5	5
		16	4	4	3	8	4	4	3	6	0	19	12	7	4	2	19	22	
		(Σ) Summe beeinflussender gewichteter Abhängigkeiten														(Σ) Summe beeinflusster gewichteter Abhängigkeiten			

Abbildung 5.3-1. Matrix der Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.

Die Summe der beeinflussenden Charakteristiken, also die Anzahl durch wie viele Charakteristiken in der zweiten Spalte eine Charakteristik in der zweiten Zeile beeinflusst wird, bildet in dieser Arbeit den zweiten Aspekt für eine Klassifizierung der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.

Die *Tabelle 5.3-2* klassifiziert die Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme nach dem zweiten Klassifizierungsaspekt, also den identifizierten Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken entsprechend der Abhängigkeitsmatrix.

Tabelle 5.3-2. Klassifizierung nach Aspekt 2: Abhängigkeiten.

Abhängigkeiten-Score aus Abhängigkeitsmatrix	Punkteband	Ebene	Charakteristik
22-19	4	1 - Unternehmensebene	Veränderungsfähigkeit, Wandlungsfähigkeit, Rekonfigurierbarkeit
18-15	4	2 - Fabrik- bzw. Standortebene	Adaptivität
14-11	4	3 - Produktionslinienebene	Robustheit
10-07	4	4 - Zellenebene	Skalierbarkeit, Integrierbarkeit
06-04	3	5 - Maschinenebene	Agilität, Dezentralität, Modularität, Interoperabilität, Kompatibilität,
00-03	4	6 - Element-Ebene	Flexibilität, Mobilität, Neutralität, Umrüstbarkeit, Universalität,

Die *Tabelle 5.3-2* folgt bei der Klassifizierung der Charakteristik dem zweiten Klassifizierungsaspekt. Der erste Klassifizierungsaspekt leitet aus den Definitionen eine Einordnung der Charakteristiken ab. Um beide Klassifizierungsaspekte berücksichtigen und daran anknüpfend eine gesamtheitliche Klassifizierung der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme zu erzielen, werden die Charakteristiken in *Tabelle 5.3-3* unter Berücksichtigung beider Klassifizierungsaspekte gegliedert. Die gesamtheitliche Klassifizierung zeigt eine übereinstimmende Einordnung der Charakteristiken nach beiden Klassifizierungsaspekten bei über der Hälfte der betrachteten Charakteristiken. Bei vier weiteren Charakteristiken unterscheidet sich die Klassifizierung zwischen den Aspekten um eine Ebene. Dies ist in vielen Fällen auf die Perspektive der betrachteten Charakteristiken zurückzuführen und führte bei der Auswertung der Charakteristiken nach dem ersten Klassifizierungsaspekt zu Ausprägungen in die nächst über- oder untergeordneten Ebenen. Andere Charakteristiken weisen eine differenziertere Einordnung auf. Die Agilität wird demnach stark unterschiedlich eingeordnet. In diesen Fällen dient der erste Klassifizierungsaspekt in dieser Arbeit zur Einordnung der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.

Tabelle 5.3-3. Klassifizierung der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.

Pos.	Ebene	Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme		1 Unternehmensebene	2 Fabrik- bzw. Standortebene	3 Produktionslinie	4 Zellenebene	5 Maschinenebene	6 Element-Ebene	
		A2	A1							
	Wandlungsfähigkeit	A2								
		A1				●				
	Veränderungsfähigkeit	A2	●							
		A1	●							
	Universalität	A2							●	
		A1							●	
	Umrüstbarkeit	A2						●		
		A1						●		
	Skalierbarkeit	A2					●			
		A1					●			
	Robustheit	A2								
		A1					●			
	Rekonfigurierbarkeit	A2								
		A1				●				
	Neutralität	A2							●	
		A1							●	
	Modularität	A2					●			
		A1								
	Mobilität	A2								
		A1					●			
	Kompatibilität	A2								
		A1						●		
	Interoperabilität	A2						●		
		A1						●		
	Integrierbarkeit	A2					●			
		A1					●			
	Flexibilität	A2								
		A1			●					
	Dezentralität	A2						●		
		A1						●		
	Agilität	A2								
		A1			●					
	Adaptivität	A2								
		A1			●					

● = Klassifizierung in dieser Arbeit

Klassifizierungsaspekte führen zur identischen Klassifizierung

Klassifizierungsaspekte mit geringer Klassifizierungs differenz

Klassifizierungsaspekte mit hoher Klassifizierungs differenz

Klassifizierungsaspekt mit Ausprägung

Legende:

5.4 Auswirkungen auf die virtuelle Inbetriebnahme

Die Klassifizierung der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme wird in diesem Kapitel zur Identifikation von Charakteristiken verwendet, die innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden können.

In den Grundlagen (*Kapitel 2*) wird die virtuelle Inbetriebnahme in dieser Arbeit als eine simulationsbasierte Validierungsmöglichkeit von Systemfunktionalitäten während der Produktionsentstehungsphase definiert. Darüber hinaus verwenden die Software-Werkzeuge zur Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme hohe Detaillierungsgrade der virtuellen Modelle. Der wesentliche Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme fokussiert sich auf die Bereiche der Produktion eines Unternehmens. Ein Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme auf Unternehmensebene ist somit nicht der primäre Verwendungszweck und ist aus diesem Grund auch kein Bestandteil in dieser Arbeit. Auf Fabrik- oder Standortebene werden virtuelle Validierungswerkzeuge vorwiegend für die Evaluierung von wirtschaftlichen Aspekten, also beispielsweise die Ausbringungsmenge der Produktion verwendet.

Aus diesen Gründen wird das potentielle Handlungsfeld der virtuellen Inbetriebnahme in dieser Arbeit zwischen der Element- und der Produktionslinienebene verortet. Diese Einordnung ist in *Tabelle 5.4-1* dargestellt und wird durch die Resultate in *Tabelle 3.2-1* zu großen Teilen bestätigt.

Tabelle 5.4-1. Charakteristiken mit potentieller Auswirkung auf die virtuelle Inbetriebnahme.

Pos.	Ebene	Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme					
1	Unternehmensex- ebene	Veränderungs- fähigkeit					
2	Fabrik- bzw. Standortebene	Adaptivität	Agilität				
3	Produktionslinie	Flexibilität	Wandlungs- fähigkeit				
4	Zellenebene	Integrier- barkeit	Modularität	Rekonfi- gurierbarkeit	Robustheit	Skalier- barkeit	Anwendungsfeld der virtuellen Inbetriebnahme
5	Maschinenebene	Dezentralität	Inter- operabilität	Mobilität	Umrüst- barkeit		
6	Element-Ebene	Kompatibilität	Neutralität	Universalität			

5.5 Zusammenfassung

Dieses Kapitel diskutierte wesentliche Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme. Zur Identifizierung dieser Charakteristiken wurden sowohl die im Kapitel des Standes der Technik vorgestellten Arbeiten und Ansätze herangezogen, als auch eine umfassende Literaturrecherche wissenschaftlicher Arbeiten durchgeführt. Die Auswertung der Arbeiten und Ansätze aus dem Kapitel Stand der Technik und der umfassenden Literaturrecherche führen zu der Identifikation und anschließenden Definition von 17 Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.

Die identifizierten Charakteristiken wurden im zweiten Teil des Kapitels klassifiziert. Die Grundlage dafür bildet die Diskussion von Möglichkeiten für eine Klassifizierungsgliederung. Neben der Klassifizierungsgliederung ist die Definition der Klassifizierungshierarchie, also der jeweiligen Ebenen, entscheidend für eine nachvollziehbare Klassifizierung der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme. Aus diesem Grund wurden bereits existierende Klassifizierungen aus der wissenschaftlichen Literatur diskutiert und dienen als Grundlage für die in dieser Arbeit gewählte Klassifizierungsgliederung.

Die Basis für die Klassifizierung, also die Einordnung der Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme in einer Hierarchie, bilden zwei wesentliche Klassifizierungsaspekte. Während der erste Aspekt die Ableitung zentraler Anhaltspunkte zur Klassifizierung aus den Charakteristik-Definitionen beschreibt, adressiert der zweite Klassifizierungsaspekt Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken und leitet daraus eine Klassifizierung ab. Unter der Berücksichtigung beider Aspekte wurden die Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme klassifiziert. Dabei ergeben die beiden Klassifizierungsaspekte neben identischen und tendenziell ähnlichen Klassifizierungen auch teilweise sehr differenzierte Resultate. Dies zeigt zwar die Grenzen des verwendeten Ansatzes auf, gleichzeitig klassifiziert dieser Ansatz jedoch über 75% der Charakteristiken identisch oder zumindest tendenziell ähnlich ein. Die Definitionen bilden dann die Grundlage der endgültigen Entscheidung, wie eine Charakteristik in dieser Arbeit klassifiziert ist.

Das Resultat der Klassifizierung wird im dritten Teil dieses Kapitels für die Identifizierung der Charakteristiken verwendet, die potenziell innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden können.

6 Vorgehensmodelle für die virtuelle Inbetriebnahme cyber-physischer Produktionssysteme

Kapitel sechs schlägt Vorgehensmodelle für die virtuelle Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen vor. Im ersten Schritt des sechsten Kapitels wird der Anwendungskontext der Vorgehensmodelle präzisiert. Daran anknüpfend wird zunächst ein allgemeines Vorgehensmodell vorgestellt, um das sachlogische Prozedere aller folgenden Vorgehensmodelle darzustellen. Das Kapitel schließt mit einer Auswahl von Charakteristiken und der inhaltlichen Beschreibung von charakteristischen Vorgehensmodellen.

6.1 Anwendungskontext

In dieser Arbeit werden Vorgehensmodelle für die virtuelle Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystemen vorgeschlagen. Ein wesentliches Ziel der Arbeit ist die Sicherung einer projektübergreifenden Anwendbarkeit der Vorgehensmodelle.

Die Vorgehensmodelle sind kein Ersatz für existierende Vorgehensmodelle oder Prozeduren in den unternehmensinternen Produktionsentwicklungsabteilungen. Sie sollen vielmehr eine ergänzende Möglichkeit bieten, Charakteristiken von cyber-physischen Produktionssystemen innerhalb der Modellbildung der virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigen zu können.

Die Vorgehensmodelle sollen Anwender der virtuellen Inbetriebnahme dabei unterstützen, ein Verständnis dafür zu entwickeln, welche Auswirkungen Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme auf die Modellbildung vor der virtuellen Inbetriebnahme haben können.

Der Prozess der virtuellen Inbetriebnahme wird isoliert innerhalb der Produktionsentwicklungsphase betrachtet. Das bedeutet im Wesentlichen, dass die Vorgehensmodelle konsequent auf die Prozedur einer virtuellen Inbetriebnahme ausgelegt sind. Gleichzeitig setzt diese Betrachtungsweise die Notwendigkeit voraus, angrenzende Prozesse und Entscheidungen, jeweils vor und nach dem Einsatz einer virtuellen Inbetriebnahme im Produktionsentstehungsprozess, in Form von Annahmen und gesetzten Informationen innerhalb der Vorgehensmodelle zu verarbeiten.

Die in dieser Arbeit vorgeschlagenen Vorgehensmodelle werden im Rahmen einer physikfreien virtuellen Inbetriebnahme erarbeitet. Eine grundsätzliche Eignung der Vorgehensmodelle auch für physikbasierte virtuelle Inbetriebnahme Prozesse wird in dieser Arbeit nicht nachgewiesen.

6.2 Allgemeines Vorgehensmodell

Die Vorgehensmodelle unterstützen Anwender bei der Berücksichtigung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme während der Modellbildung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme und unterliegen in ihrer Gesamtheit einem allgemeinen Vorgehensmodell. In diesem Kapitel wird der Aufbau des allgemeinen Vorgehensmodells erläutert. Die Basis des allgemeinen Vorgehensmodells sowie aller darauf aufbauenden und in dieser Arbeit verwendeten Vorgehensmodelle bildet das V-Modell. Nachfolgend wird das in dieser Arbeit geltende Verständnis des V-Modells stark zusammengefasst vorgestellt.

6.2.1 V-Modell

Das V-Modell wurde in frühen Arbeiten in der Softwareentwicklung mit dem übergeordneten Ziel einer Systemzerlegung und anschließenden sukzessiven Gesamtsystementwicklung vorgestellt (*VDI/VDE 2206, 2020, S. 11; Bröhl & Drösche, 1995, S. 15-40*). Kennzeichnend für das V-Modell ist das dem Symbol „V“ entsprechende Grundgerüst. Dieses dreiteilige Grundgerüst lässt sich in die Bereiche der Systemzerlegung innerhalb des linken V-Schenkels und die sukzessive Erarbeitung von Elementen und Subsystemen bis hin zum Gesamtsystem innerhalb des rechten Schenkels aufteilen (*VDI/VDE 2206, 2020, S. 11*). In aufeinander aufbauenden Teilschritten werden die vorliegenden Systemeigenschaften innerhalb des rechten V-Schenkels erarbeitet und gegenüber den Systemanforderungen innerhalb des linken V-Schenkels verifiziert und validiert (*VDI/VDE 2206, 2020, S. 11*).

In einer im Jahre 2020 erschienenen VDI-Richtlinie wird ein V-Modell auch für die Entwicklung von sogenannten „*cyber-physischen mechatronischen Systemen*“ verwendet, jedoch ohne einen besonderen Fokus auf den Prozess der virtuellen Inbetriebnahme zu setzen (*VDI/VDE 2206, 2020, S. 12*). Dennoch teilen die Autoren der Richtlinie die Auffassung, dass das V-Modell in seiner grundsätzlichen Form auch dafür geeignet sein kann, Entwicklungsprozesse moderner Systeme im Umfeld der Produktion zu unterstützen. In der wissenschaftlichen Literatur haben

verschiedenste Ausprägungen des V-Modells zu einer großen Verwendungsvielfalt mit zunehmender Anwendungsspezifizierung geführt. In dieser Arbeit wird das V-Modell zur Definition von Prozessen, Operationen und Funktionen, ausgehend von den Entscheidungen und Ergebnissen der Produktionsplanungsphase, genutzt. Dabei soll das Grundgerüst und die Kernidee des V-Modells eine sukzessive Erarbeitung von virtuelle Inbetriebnahme Projekten ermöglichen. Eine Verifizierung und Validierung der virtuellen Anlagenmodelle während der Modellierungsphase auf verschiedenen Ebenen sichert darüber hinaus die Erfüllung von Teilzielen gegenüber den definierten Anforderungen auf dem Weg zum Gesamtprojektziel ab.

6.2.2 Anforderungen an das allgemeine Vorgehensmodell

Das allgemeine Vorgehensmodell bildet die Grundlage aller in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensmodelle. Aus diesem Grund ist es so allgemeingültig zu konzipieren, dass sich aus diesem allgemeinen Vorgehensmodell weitere in dieser Arbeit zu erarbeitende Vorgehensmodelle ableiten lassen. Die aus dem allgemeinen Vorgehensmodell abgeleiteten Vorgehensmodelle entsprechen dabei strukturell dem Grundgerüst des V-Modells. Die abgeleiteten Vorgehensmodelle können in ihrer inhaltlichen Erarbeitung, differenzierte und auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmte Teilverfahren aufweisen, jedoch ohne Auswirkung auf die ursprüngliche Gestalt des allgemeinen Vorgehensmodells.

Innerhalb der zu erarbeitenden Vorgehensmodelle sollen im gesamten virtuelle Inbetriebnahme Prozess Möglichkeiten aufgezeigt werden, wie zukünftig auch Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme berücksichtigt werden können. Das allgemeine Vorgehensmodell und alle daraus abgeleiteten Vorgehensmodelle müssen aus diesem Grund die Prozeduren des Modellentwicklungsprozesses der virtuellen Inbetriebnahme adressieren. Das bedeutet, dass die Restriktionen, der zu erarbeitenden virtuellen Anlagenmodelle während des Modellentwicklungsprozesses, auch in den Vorgehensmodellen zu beachten sind.

Das Konzept des allgemeinen Vorgehensmodells und damit alle daraus ableitbaren Vorgehensmodelle müssen die Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme, die in dieser Arbeit betrachtet werden, adressieren. Maßgeblich sind die erarbeiteten Definitionen und Möglichkeiten die, im Sinne einer unternehmensseitigen Reaktionsfähigkeit, nutzbar sind, um bei entstehenden Turbulenzen im Umfeld der Produktion handlungsfähig zu bleiben.

6.2.3 Aufbau des allgemeinen Vorgehensmodells

Das Grundgerüst des allgemeinen Vorgehensmodells zur Berücksichtigung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme innerhalb des gesamten Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme entspricht dem Aufbau eines V-Modells. Das allgemeine Vorgehensmodell ist in *Abbildung 6.2-1* perspektivenorientiert dargestellt.

Das allgemeine Vorgehensmodell sowie alle sich daraus ableitenden Vorgehensmodelle in dieser Arbeit sind Bestandteile des Produktionsentwicklungsprozesses. Die Vorgehensmodelle werden aus diesem Grund im Anschluss an die Produktionsplanungsphase, während der Produktionsentwicklungsphase und vor der Produktionsrealisierungsphase eingesetzt. Aus der Perspektive der Produktionsentwicklung liegen mit dem Einsatz der, in dieser Arbeit vorgestellten, Vorgehensmodelle die Ergebnisse aus der Produktionsplanungsphase vor. Diese Ergebnisse umfassen neben der strategischen Ausrichtung der Produktion, auch das zukünftig angestrebte Geschäftsmodell und die Aufträge für die nachgelagerte Phase der Produktionsentwicklung (*VDI/VDE 2206, 2020, S. 10*).

Das allgemeine Vorgehensmodell ist in Haupt- und Unterebenen gegliedert. Eine Untergliederung des V-Models in Ebenen geht in der wissenschaftlichen Literatur auch auf eine Arbeit aus dem Jahre 2005 zurück, bei der drei Ebenen für eine multidisziplinäre Betrachtung mechatronischer Systeme definiert wurden (*Bender, 2005, S. 44-50*). In dieser Arbeit besteht das V-Modell, in dessen allgemeiner Betrachtungsweise, aus einer Produktebene und einer Produktionsebene. Letztere besteht aus vier weiteren Unterebenen - einer Prozess-, einer Operations-, einer Funktions- und einer Ressourcenebene. Die konkreten Inhalte der Ebenen werden in der ebenenorientierten Betrachtungsweise des Modells in den *Kapiteln 6.2.4 und 6.2.5* präzisiert.

Die zwei Hauptebenen und die vier Unterebenen werden von zwei zueinander versetzten V-Modellen durchlaufen. Die V-Modelle repräsentieren zwei Ausgangssituationen, auch Perspektiven. Das erste V-Modell fokussiert die erste Perspektive, bzw. Ausgangssituation A. Das zweite V-Modell richtet den Blick auf die zweite Perspektive, bzw. Ausgangssituation B. Während die Ausgangssituation A die Perspektive einer Produktionsneuplanung in der Produktionsentwicklungsphase repräsentiert, adressiert die Ausgangssituation B Handlungsempfehlungen bei Eintritt von Turbulenzen im Umfeld existenter Produktionssysteme.

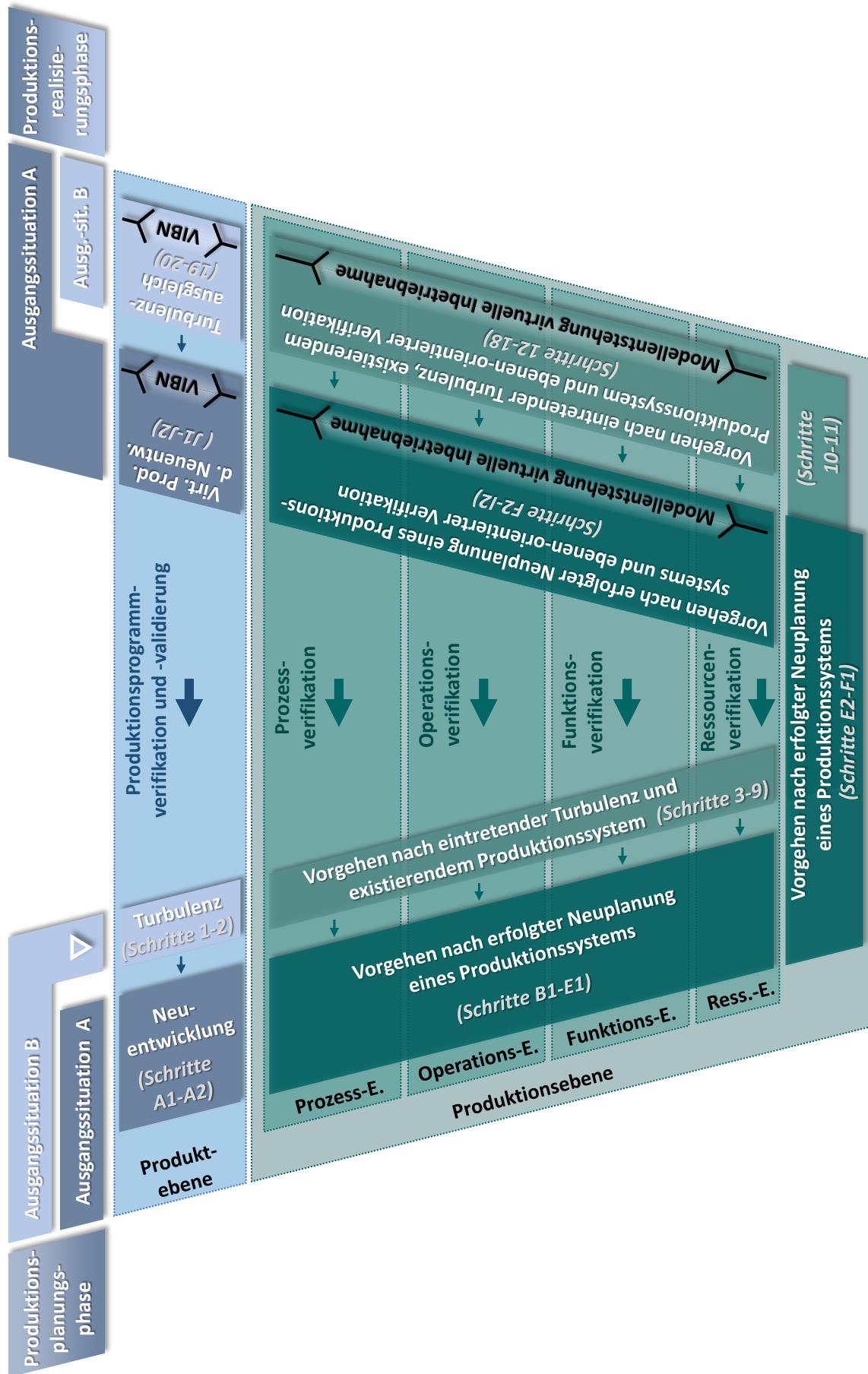


Abbildung 6.2-1. Perspektivenorientierte Darstellung des allgemeinen Vorgehensmodells.

Die Verläufe der V-Modelle werden nachfolgend zunächst perspektivenorientiert entsprechend *Abbildung 6.2-1* vorgestellt. Anschließend folgt eine ebenen-orientierte Konkretisierung der Arbeitsinhalte, infolge einer Produktionsneuplanung in den *Kapiteln 6.2.4 und 6.2.5* in Anlehnung an *Abbildung 6.2-2*.

In der Betrachtung der ersten Ausgangssituation, also Ausgangssituation A, wird aus Sicht der Produktionsentwicklung ein neues Produktionssystem geplant. Der zentrale Ausgangspunkt für eine Produktionssystementstehung ist die Identifizierung aller, auf diesem zukünftig existierenden Produktionssystem zu produzierenden, Produkte innerhalb eines zu definierenden Produktprogramms. Die Identifizierung des Produktprogramms und aller darin eingeordneten Produkte kennzeichnet daher die wesentlichen Arbeitsinhalte der Vorgehensschritte A1-A2 auf der Produktebene innerhalb des allgemeinen Vorgehensmodells.

Daran anknüpfend wird das auf der Produktebene erarbeitete Wissen dazu verwendet, die Arbeitsinhalte der Vorgehensschritte B1-E1 auf der Produktionsebene zu präzisieren. Dazu werden im ersten Schritt die Anforderungen an die, zur Produktion der Produkte notwendigen, Prozesse identifiziert. Basierend auf den identifizierten Prozessanforderungen können Anforderungen an die Operationen, die der Prozess- und Teilprozessdarstellung in virtuellen Entwicklungsumgebungen dienen, abgeleitet werden. Die Operationen lösen andererseits einen Bedarf an Funktionalität der zukünftig verwendeten Ressourcen aus. Die Anforderungen an diese ressourcenseitige Funktionalität gilt es anschließend lösungsneutral zu konkretisieren.

Im Anschluss an die qualitative sowie quantitative Ressourcenidentifizierung, erfolgt im zentralen Schenkel des Vorgehensmodells, während der Vorgehensschritte E2-F1, die Beschaffung und Organisation von bereits existenten Daten für die virtuelle Inbetriebnahme.

Mit den Ergebnissen der Datenbeschaffung und -organisation beginnt der Prozess der virtuellen Modellentwicklung. Der Prozess der virtuellen Modellentwicklung konkretisiert inhaltlich die Vorgehensschritte F2-I2 und durchläuft in umgekehrter Reihenfolge die vier Unterebenen der Produktionsebene mit dem Ziel der Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme auf der Produktebene. Während der virtuellen Modellentwicklung werden die entstehenden virtuellen Teilmodelle des zukünftigen Produktionssystems dazu verwendet, die definierten Anforderungen auf Ressourcen-, Funktions-, Operations- und Prozessebene zu verifizieren.

Während der Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme wird die Synergie aller entwickelten virtuellen Teilmodelle der zukünftig existierenden Produktionssysteme verwendet, um die an das Produktionssystem gestellten Anforderungen auf Produktebene zu verifizieren. Innerhalb der Vorgehensschritte J1-J2 des allgemeinen Vorgehensmodells, wird die Praktikabilität des Produktionsvorhabens durch die virtuelle Inbetriebnahme validiert. Mit dem Übergang in die nachgelagerte Produktionsrealisierungsphase endet die Beschreibung der ersten Perspektive, oder auch Ausgangssituation A, des allgemeinen Vorgehensmodells in *Abbildung 6.2-2*.

Die zweite Perspektive, oder auch Ausgangssituation B, fokussiert, auf das Produktionsprogramm einwirkende, Turbulenzen im Umfeld einer bereits existierenden Produktion. Turbulenzen, die auf ein Produktionsprogramm einwirken, können umfassende Auswirkungen auf die nachgelagerten Planungsmaßnahmen aufweisen. In dieser Arbeit wird darunter die Einführung neuer Produkte verstanden. Dabei ist es zunächst für die Beschreibung des allgemeinen Vorgehensmodells vernachlässigbar, ob die Einführung neuer Produkte bereits während der Neuplanung eines Produktionssystems berücksichtigt wurde. Unter der Einführung neuer Produkte werden in dieser Arbeit nachfolgend Produkte verstanden, die sich in ihrer Form, Gestalt oder Struktur von den Produkten eines existierenden Produktionsprogrammes unterscheiden, jedoch durch den Einsatz desselben Produktionssystems produziert werden sollen. Daher sind die Ausmaße der Turbulenzen auf das existierende Produktionsprogramm in den Vorgehensschritten 1-2 der Ausgangssituation B auf der Produktebene zu konkretisieren.

Innerhalb der Vorgehensschritte 3-9 werden die Auswirkungen der Turbulenzen auf der Produktionsebene identifiziert. Dabei werden ebenen-orientierte Anforderungsabweichungen zum existierenden Produktionsprogramm untersucht. In den nachgelagerten Vorgehensschritten 10-11 kann, analog der Vorgehensschritte E2-F1, eine Beschaffung wie auch Organisation von Modelldaten erfolgen. Daran anknüpfend adressieren die Vorgehensschritte 12-18 identifizierte Anforderungsabweichungen, durch ebenen-orientierte Änderungsmaßnahmen innerhalb der virtuellen Modelle. Die Ausgangssituation B endet erfolgreich mit der Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme und der Feststellung eines, durch die ergriffenen Maßnahmen erzielten, Turbulenzausgleichs.

6.2.4 Systementwurfsphase

Die Systementwurfsphase des allgemeinen Vorgehensmodells richtet den Fokus auf die Vorgehensschritte A1 bis E1, infolge einer Produktionsneuplanung, ausgehend von der Produktebene hin zur Produktionsebene. Dieses Kapitel erläutert die wesentlichen Inhalte der Vorgehensschritte A1 bis E1 in Anlehnung an *Abbildung 6.2-2*.

Die Produktebene repräsentiert die erste Ebene der Vorgehensmodelle in dieser Arbeit und konkretisiert wesentliche, an die Produkte gestellte, Anforderungen aus der Perspektive der Produktionsentwicklung. Die Produktebene ist in die beiden Tätigkeitsfelder A1 und A2 entsprechend der *Abbildung 6.2-2* gegliedert. Das übergeordnete Ziel des ersten Tätigkeitsfeldes A1 ist die Produktion eines Produktionsprogrammes. Das Produktionsprogramm ist in seiner konzeptionellen Ausfertigung ein Ergebnis der Produktionsprogrammplanung und konkretisiert die zu produzierenden Produktumfänge für jedes betrachtete Produktionssystem. Die mit dem Tätigkeitsfeld A1 verbundene Anforderung umfasst aus diesem Grund die Existenz und die Verfügbarkeit eines Produktionsprogramms als qualitative Grundlage für das nachfolgende Tätigkeitsfeld A2. Innerhalb des Tätigkeitsfeldes A2 werden die, in dem Produktionsprogramm verorteten, Produkte strukturell analysiert. Diese strukturelle Analyse ermöglicht den Zusammenschluss mehrerer Produkte zu Produktfamilien aufgrund ihrer Gleichartigkeit. Diese Gleichartigkeit ermöglicht eine gleichzeitige Betrachtung mehrerer Produkte während der Produktionsentwicklung. Die wesentliche, aus diesem Tätigkeitsfeld ableitbare, Anforderung beinhaltet die Notwendigkeit der Identifizierung aller Produktstrukturen.

Die Prozessebene folgt der Produktebene als erste untergeordnete Ebene der Produktionsebene und bündelt alle, zur Produktion des Produktionsgramms notwendigen, Produktionsprozesse. Auf der Prozessebene sind im Rahmen des Tätigkeitsfeldes B1 alle notwendigen Prozesse zur Produktion des Produktionsprogramms zu identifizieren. Zur Identifikation der notwendigen Prozesse dienen die analysierten Produktstrukturen. Eine konkrete inhaltliche Beschreibung, wie aus den Produktstrukturen notwendige Prozesse definiert werden können, ist nicht Bestanteil der Zielstellung in dieser Arbeit. Jedoch existieren in der wissenschaftlichen Literatur Ansätze, die konzeptionelle Prozesse aus Produktstrukturen, beispielsweise auf Basis geometrischer, qualitativer und funktionaler Produktmerkmale ableiten (*Burggräf et al., 2021, S. 172*). Anknüpfend an die identifizierten Prozesse im Tätigkeitsfeld B1, sind im Tätigkeitsfeld B2

Prozessreihenfolgen zu bestimmen. Etablierte Methoden zur Bestimmung von Prozessreihenfolgen können Prozesskettenanalysen oder die Bestimmung von Fertigungsfolgen auf Basis von Technologieketten sein (*Burggräf et al., 2021, S. 176*). Darauf aufbauend ist die Analyse der Prozessreihenfolgen eine weitere wesentliche Anforderung auf der Prozessebene.

Mit den Ergebnissen der Prozessebene können auf der Operationsebene die, zur Erfüllung eines Prozesses notwendigen, Operationen analysiert werden. Während es sich bei einem Prozess in dieser Arbeit, um die Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen handelt, werden unter Operationen die Verarbeitungsschritte der Prozessvorgänge verstanden. Ein Prozess besteht somit aus mehreren, oft auch miteinander interagierenden, Operationen. Die Identifizierung von notwendigen Operationen sowie die Bestimmung der Ausführungsreihenfolge aller identifizierten Operationen beschreiben die Anforderungen und Kerninhalte der Tätigkeitsfelder C1 und C2 auf der Operationsebene.

Die Umfänge der identifizierten Prozesse und Operationen beeinflussen maßgeblich die Anforderungen an die Funktionalität der zu entwickelnden Produktionssysteme. Funktionen beschreiben in dieser Arbeit das erwartungsgemäße Verhalten eines Systems (*Brökelmann, 2015, S. 11*). Eine Funktion beschreibt die Wirkzusammenhänge zwischen einzelnen Elementen oder Segmenten in einem System. Funktionen bilden in dieser Arbeit die Grundlage zur Ausführung von Operationen und Prozessen. Auf Funktionsebene sind daher die Anforderungen an die notwendige Systemfunktionalität zu identifizieren. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ist die Definition von Abhängigkeiten zwischen mehreren Einzelfunktionen eines Produktionssystems. Besonders sicherheitsrelevante Funktionen von Produktionssystemen können Einfluss auf die übrige Systemfunktionalität nehmen, weshalb die Anforderungen an eine Funktionsreihenfolge zu analysieren sind.

Auf Ressourcenebene werden die Anforderungen an die zukünftigen Produktionsressourcen bestimmt. Die Grundlage für die ressourcenseitige Anforderungsbestimmung liefert in dieser Arbeit die festgelegte Systemfunktionalität aus der vorgelagerten Ebene. Die Identifizierung der notwendigen Ressourcen im Tätigkeitsfeld E1 kennzeichnet den abschließenden Schritt der Anforderungsbestimmung in allen Vorgehensmodellen. Gleichzeitig endet mit diesem Schritt auch die Systementwurfsphase innerhalb des linken Schenkels aller, in dieser Arbeit vorgestellten, Vorgehensmodelle.

6.2.5 Datenbeschaffung, Datenorganisation und Systemintegrationsphase

Die Datenorganisationsphase beinhaltet die wesentlichen Inhalte der Vorgehensschritte E2 und F1 im zentralen Schenkel des Vorgehensmodells. Die Systemintegrationsphase umfasst die Vorgehensschritte F2-J2 im rechten Schenkel aller Vorgehensmodelle in dieser Arbeit. Die Inhalte der Datenbeschaffungs-, Datenorganisations- und Systemintegrationsphase werden aus der Perspektive einer Produktionsneuplanung, in Anlehnung an Abbildung 6.2-2, näher erläutert.

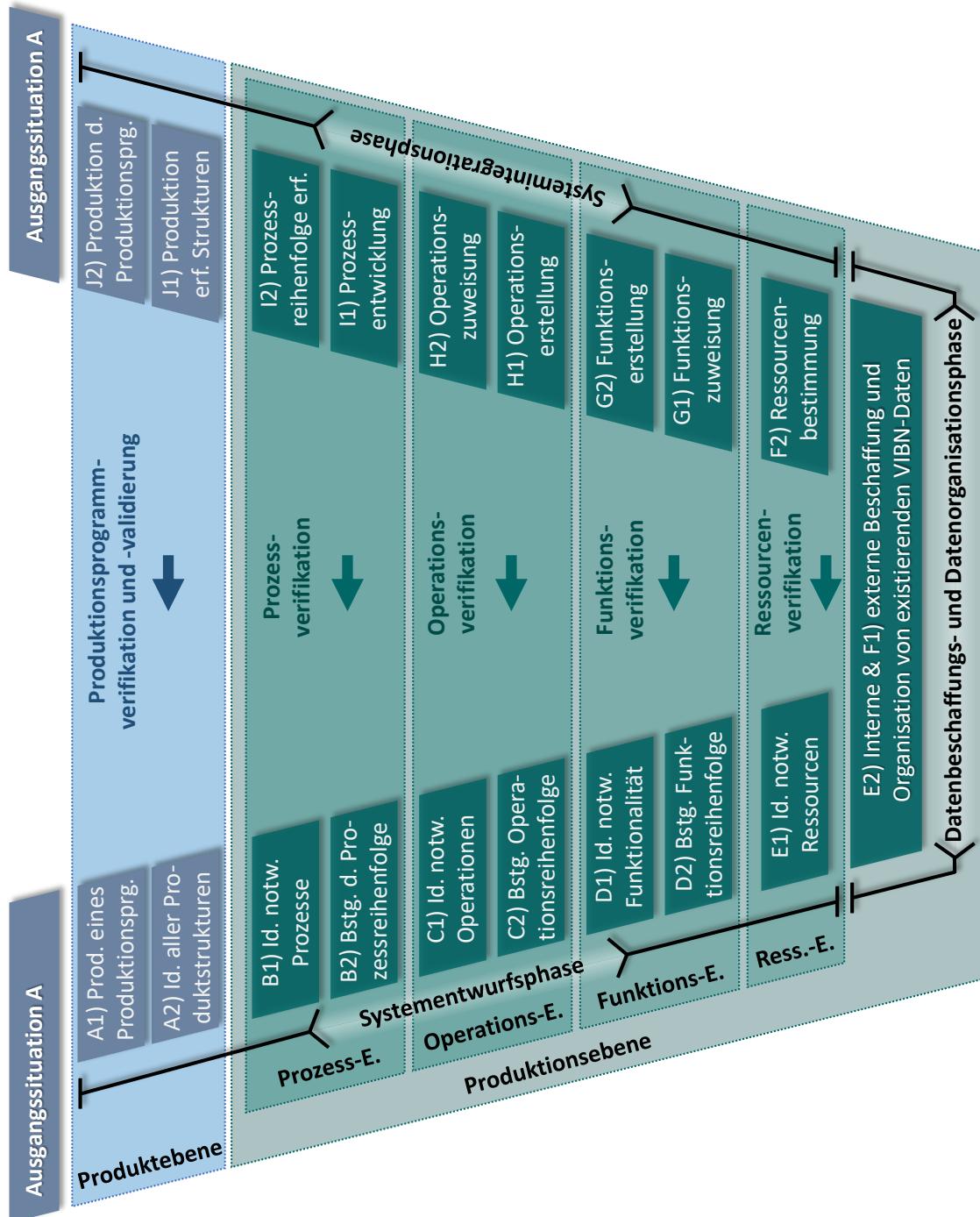


Abbildung 6.2-2. Ebenen-orientierte Darstellung des allgemeinen Vorgehensmodells.

Die Datenorganisationsphase besteht aus den Vorgehensschritten E2 und F1 und verfolgt das Ziel der Beschaffung und Organisation von bereits existenten Daten für die Modellbildung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme. Während die Beschaffung den reinen Aspekt des Datenbezugs aus unternehmensinternen und -externen Quellen berücksichtigt, umfasst die Datenorganisation eine projektorientierte Datenprüfung und -aufbereitung. Die Modelldaten können Konstruktionsdaten, kinematische Informationen, Verhaltensmodelldaten oder bereits modellierte Softwareprogramme umfassen. Die Identifizierung sowie die Beschaffung und Organisation von existenten und verfügbaren Modelldaten beschreibt den wesentlichen Arbeitsinhalt der Vorgehensschritte E2-F1 im allgemeinen Vorgehensmodell.

Die Systemintegrationsphase umfasst die Vorgehensschritte F2-J2 und beginnt auf der Ressourcenebene mit dem Vorgehensschritt F2 und einer initialen Bestimmung der zukünftig eingesetzten Produktionsressourcen, auf Basis der im Vorgehensschritt E1 identifizierten notwendigen Ressourcen.

Den Ressourcen werden im folgenden Vorgehensschritt G1, die in den Vorgehensschritten D1 und D2 identifizierten und notwendigen, Funktionen zugeordnet. Anschließend werden die zugeordneten Funktionen im Vorgehensschritt G2 technologisiert. Das bedeutet eine Überführung der bisher numerisch formulierten Funktionen in technologiebasierte Wirkungsweisen zur Darstellung der Systemfunktionalität der eingesetzten Ressourcen.

Auf der Operationsebene bildet die Systemfunktionalität die Grundlage für die Erstellung von Operationen im Vorgehensschritt H1. Die Operationserstellung verläuft zunächst ressourcenorientiert und anschließend produktorientiert im Ressourcenverbund. Während der produktorientierten Operationsentwicklung können vollständige oder in Teilen zerlegte Operationen im Rahmen des Vorgehensschrittes G2 entweder einer oder mehreren Ressourcen zugewiesen werden.

Auf der Prozessebene werden die entwickelten Operationen gebündelt, um die notwendigen Produktionsprozesse im Vorgehensschritt I1 erarbeiten zu können. Die Kombination vieler Operationen zu mehreren Prozessen erfordert zudem die Festlegung einer Prozessreihenfolge. Die Bestimmung der Prozessreihenfolge für alle betrachteten Produkte ist der wesentliche Arbeitsinhalt des Vorgehensschrittes I2.

Auf Produktebene werden die entwickelten Produktionsprozesse gegenüber den definierten Produktanforderungen verifiziert. Dafür wird zunächst im Vorgehensschritt J1, die Produzierbarkeit der identifizierten Produktstrukturen durch die Produktionsprozesse verifiziert. Daran anknüpfend wird eine repräsentative Produktmenge aus dem Produktionsprogramm zur Verifizierung der Produktionsprozesse gegenüber den definierten Anforderungen im Vorgehensschritt J2 herangezogen.

6.3 Virtuelle Inbetriebnahme im allgemeinen Vorgehensmodell

In diesem Kapitel wird die Integration des gesamten Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme in das allgemeine Vorgehensmodell diskutiert. Neben den konkreten Inhalten der Datenbeschaffung und -organisation, werden die wesentlichen Aspekte der Modellentstehung und der Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme diskutiert und gegenüber dem allgemeinen Vorgehensmodell kontextualisiert. Die Einordnung des gesamten Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme in das allgemeine Vorgehensmodell ist in *Abbildung 6.3-1* dargestellt.

6.3.1 Datenbeschaffung und -organisation

Der Bereich der Datenorganisation und -beschaffung umfasst die Vorgehensschritte E2 und F1 und verfolgt die wesentliche Zielstellung, für eine virtuelle Inbetriebnahme relevante Daten im Unternehmen selbst oder außerhalb des Unternehmens zu beschaffen und projektorientiert zu organisieren. Zur Zielerreichung gilt es im Vorgehensschritt E2 zunächst für das betrachtete Projekt relevante Daten unternehmensintern oder -extern zu identifizieren. Die Grundlage zur Entscheidung, welche Daten relevant sind liefern der vorgelagerte Vorgehensschritt E1 und die Ergebnisse der Identifizierung notwendiger Ressourcen. Daran anknüpfend ist die Verfügbarkeit der relevanten Daten eine weitere essentielle Voraussetzung für einen Datenbezug und den erfolgreichen Aufbau eines Datenbestandes. Die konkreten Inhalte des Vorgehensschrittes F1 betreffen die wesentlichen Aspekte der Datenorganisation. Das Ziel der Datenorganisation ist zunächst eine projektorientierte Datenbestandprüfung, in der der Datenumfang und die Datenqualität gegenüber den Projektanforderungen verifiziert werden. Eine nachgelagerte Möglichkeit zur Datenaufbereitung dient der projektorientierten Datenanreicherung und füllt existente Datenlücken als abschließender Schritt der Datenorganisationsphase.

6.3.2 Modellentstehung

Der Modellentstehungsprozess der virtuellen Inbetriebnahme erstreckt sich über die Vorgehensschritte E2 bis H2 im allgemeinen Vorgehensmodell. Entsprechend der Ausführungen in *Kapitel 2.3.3* über die Inhalte zur Vorbereitung einer virtuellen Inbetriebnahme, gliedert sich der Modellentstehungsprozess im allgemeinen Vorgehensmodell in die Bereiche CAD Konstruktion, Kinematik, Verhalten und Steuerungsprogrammerstellung. Nachfolgend werden diese Bereiche in das ebenen-orientierte allgemeine Vorgehensmodell eingeordnet. Die Ergebnisse dieser Einordnung sind in *Abbildung 6-3-1* dargestellt. Der wesentliche Fokus bei der Einordnung wird auf die Möglichkeiten zur Verifizierung definierter Anforderungen gesetzt.

Der Modellentstehungsprozess beginnt mit der Verarbeitung existierender CAD-Konstruktionsdaten oder ihrer Modellierung im Rahmen des Vorgehensschrittes E2. Bereits während der CAD-Konstruktion kann die Erfüllung geometrischer Anforderungen der verwendeten Ressourcen in der virtuellen Umgebung verifiziert werden. Es empfiehlt sich, diese Verifikation in zwei Richtungen durchzuführen. Auf der einen Seite sind die Anforderungen an die geometrische Zuordnung zwischen den eingesetzten Ressourcen zu diskutieren. Auf der anderen Seite ist die Gesamteinordnung aller eingesetzten Ressourcen gegenüber der Systemperipherie gleichermaßen zu berücksichtigen.

In der zweiten Phase des Modellentstehungsprozesses werden die Konstruktionsdaten durch kinematische Informationen angereichert. Der modellbildende Anteil dieser Phase verläuft parallel zu den Vorgehensschritten F1 und F2. Den Kern dieser Phase bildet die Erstellung kinematischer Wirkketten auf Basis ihrer geometrischen Eigenschaften. Diese Wirkketten werden durch Bewegungsreferenzen parametrisiert und stellen im Ergebnis eine grundsätzliche Systemfunktionalität dar. Die Erarbeitung dieser Systemfunktionalität kann somit auf Funktionsebene zur Verifikation der als notwendig identifizierten Funktionen dienen.

Die mittels kinematischer Informationen angereicherten Konstruktionsdaten werden in der dritten Phase des Modellentstehungsprozesses zur Erarbeitung von Operationen verwendet. Für die Erarbeitung von Operationen werden die Funktionen der kinematischen Wirkketten in einen zeitlichen Kontext überführt. Das bedeutet, dass die modellierten Bewegungsmöglichkeiten dazu verwendet werden, die Geometriemodelle zu definierten Zeitpunkten an definierte Lokalitäten

zu verfahren. Dadurch werden die Geometriemodelle zusätzlich mit einem zeitlichen Verhalten angereichert. Aus diesem Grund wird dieser Abschnitt als Phase der Verhaltensmodellierung zur Erarbeitung von Operationen während der Vorgehensschritte G1 und G2 im allgemeinen Vorgehensmodell verwendet. Die Darstellung von Operationen, oder auch Teilvergängen von Prozessen, dient beispielsweise zur zeitlichen oder geometrischen Verifikation von Operationen, die innerhalb der Vorgehensschritte C1 und C2 als notwendig definiert wurden.

In der letzten Phase des Modellentstehungsprozesses werden die Steuerungsprogramme auf Prozessebene und parallel zu den Vorgehensschritten H1 und H2 des allgemeinen Vorgehensmodells erarbeitet. Mit den Ergebnissen der Steuerungsprogrammerstellung können Produktionsprozesse auf Prozessebene bereits so vollumfänglich erarbeitet sein, dass sie vollumfänglich den Systemanforderungen während des Produktionsbetriebs entsprechen. Dazu dienen die Operationen im Verbund zur Ausarbeitung gesamter Produktionsprozesse unter Einbezug aller, für die betrachteten Prozesse, notwendiger Produktionsressourcen.

6.3.3 Virtuelle Inbetriebnahme

Die Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme dient zur virtuellen Verifizierung und Validierung der erstellten Produktionsprozesse und der eingesetzten Ressourcen gegenüber den definierten Anforderungen während der Systementwurfsphase.

Im ersten Schritt werden dabei die Produktionsprozesse gegenüber den definierten Anforderungen im Gesamtverbund verifiziert. Im zweiten Schritt werden die Produktionsprozesse gegenüber den definierten Anforderungen auf der Produktebene validiert. Die wesentlichen Anforderungen auf der Produktebene kennzeichnen die grundsätzliche Produzierbarkeit aller Produktstrukturen sowie einer repräsentativen Menge an Produkten aus dem betrachteten Produktionsprogramm. Durch den Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme wird nicht nur ausschließlich ein zukünftig eingesetztes Steuerungsprogramm validiert, sondern auch eine Möglichkeit auf Produktebene geschaffen, die Ergebnisse aus den vorgelagerten Produktionsebenen zu verifizieren.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Phasen der virtuellen Inbetriebnahme und ihre Einordnung in die ebenen-orientierte Darstellung des allgemeinen Vorgehensmodells sind in *Abbildung 6.3-1*

dargestellt. Für den Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme in dieser Arbeit wird entsprechend der Einordnung aller Phasen nach *Abbildung 6.3-1* im weiteren Verlauf der Arbeit verfahren.

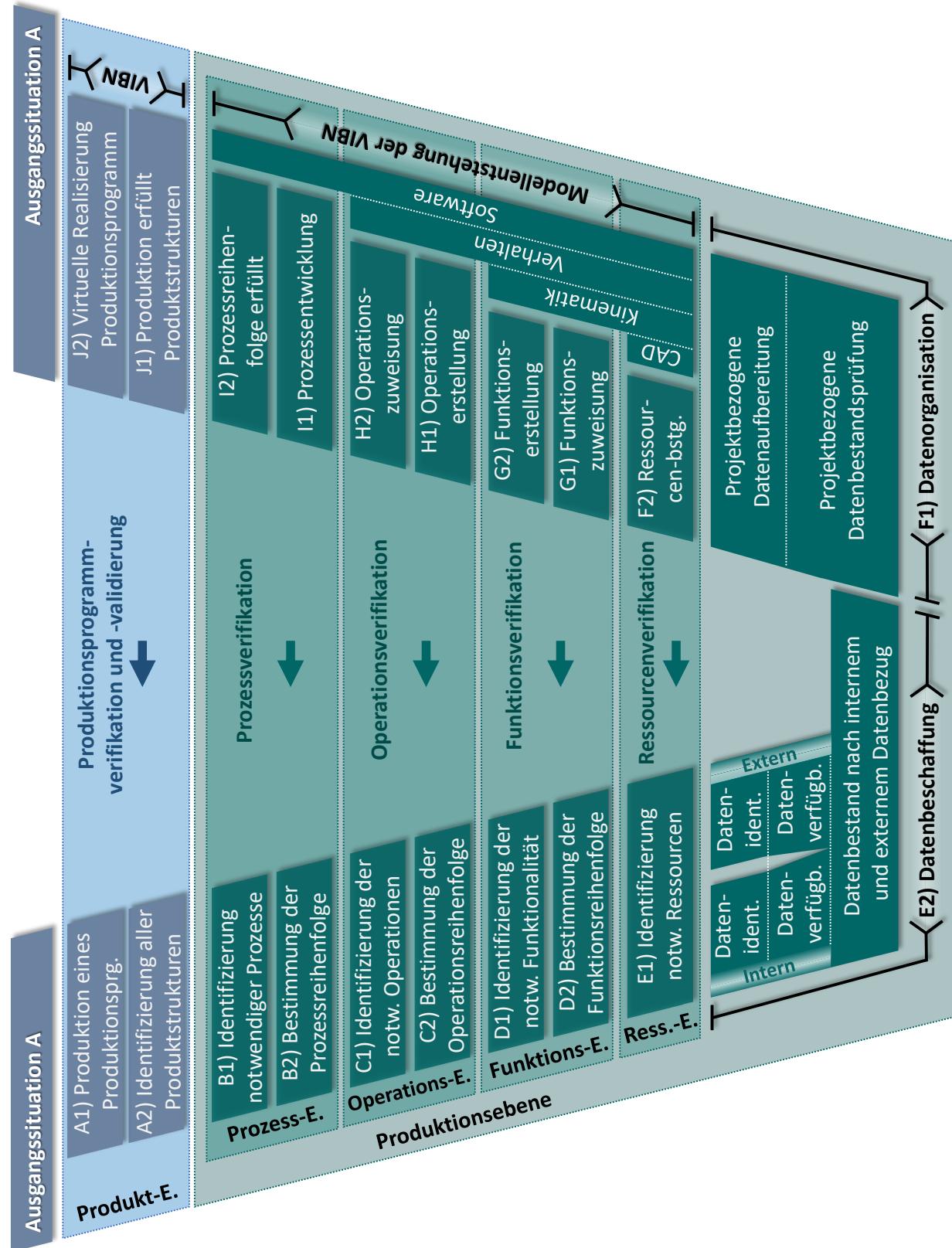


Abbildung 6.3-1. Ebenen-orientierte Darstellung des allgemeinen Vorgehensmodells infolge einer Produktionsneuplanung und einer integrierten virtuellen Inbetriebnahme.

6.4 Charakteristik-Auswahl

In *Kapitel 5.4* werden Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme identifiziert, die innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme, aufgrund ihrer Klassifikation in *Tabelle 5.4-1*, berücksichtigt werden können. Dabei handelt es sich um 14 Charakteristiken. Eine Betrachtung, wie alle 14 Charakteristiken innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden können, ist, aufgrund des dabei entstehenden thematischen Umfanges, nicht das Ziel dieser Arbeit. Da sich cyber-physische Produktionssysteme im Wesentlichen durch Charakteristik-Kombinationen beschreiben lassen, ist die Betrachtung einer einzigen Charakteristik, entsprechend der in der Arbeit getroffenen Definition von cyber-physischen Produktionssystemen, nicht repräsentativ.

Aus diesen Gründen ist eine Auswahl an Charakteristiken zu treffen, die durch ihre kombinierte Betrachtungsweise die Definition von cyber-physischen Produktionssystemen in dieser Arbeit erfüllen. Das zentrale Ziel der Arbeit ist, Möglichkeiten aufzuzeigen, wie Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden können. Das bedeutet für die Charakteristik-Auswahl, dass die Validierungsmöglichkeiten vor und während der virtuellen Inbetriebnahme auch die Merkmale der auszuwählenden Charakteristika adressieren. Somit entfallen Charakteristiken, die auf der Elementebene verortet sind, da sich ihre Merkmale innerhalb der Modellbildung und der Durchführung der virtuellen Inbetriebnahme nur als teilweise virtuell Verifizierbar und Validierbar einstufen lassen. Charakteristiken, die auf der Maschinenebene klassifiziert sind, eignen sich grundlegend für eine qualitative Validierung innerhalb des gesamten Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme. Im Kontext einer gesamten cyber-physischen Produktion erscheint die Auswahl von Charakteristiken auf Maschinenebene jedoch nicht repräsentativ. Deshalb werden die Charakteristiken auf der Produktionslinien- und der Zellenebene näher betrachtet.

Ein besonderes Interesse in der wissenschaftlichen Literatur ist den Charakteristiken Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandlungsfähigkeit zuzuordnen. Den Kern vieler wissenschaftlichen Arbeiten kennzeichnet die strategische Auslegung zukünftig existierender Produktionen mittels einer dieser Charakteristiken und die Diskussion anschließender unternehmensexterner Reaktionsmöglichkeiten auf sich verändernde Bedingungen im Umfeld der Produktion. Dass die Charakteristiken Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandlungsfähigkeit auch aus der Sicht

eines virtuelle- Inbetriebnahme-Prozesses auf großes Interesse stoßen, zeigen bereits existierende wissenschaftliche Arbeiten, die teilweise auch im *Kapitel 3* in dieser Arbeit vorgestellt wurden. Gleichzeitig bieten die Charakteristiken Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandlungsfähigkeit ein erhebliches Potenzial, zusätzliche Charakteristiken zu berücksichtigen. In der Abhängigkeitsmatrix in *Kapitel 5.3.4* werden befähigende und begünstigende Charakteristiken dieser drei Charakteristiken vorgestellt. Für die Berücksichtigung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme werden in dieser Arbeit die Flexibilität, die Rekonfigurierbarkeit und die Wandlungsfähigkeit ausgewählt und nachfolgend nochmals stark zusammengefasst vorgestellt.

6.4.1 Verständnis von Flexibilität

Ein Produktionssystem gilt in dieser Arbeit, entsprechend *Definition D5.2-3* als flexibel, sofern die betrachteten Produkte durch die eingesetzten Ressourcen produziert werden können, ohne dass die Ressourcen selbst nach dem erstmaligen Produktionsstart physisch verändert werden müssen. Die eingesetzten Ressourcen können jedoch durch Veränderungen in ihrer Systemlogik, in ihrem Verhalten teilweise, an sich verändernde Umgebungsbedingungen, angepasst werden.

6.4.2 Verständnis von Rekonfigurierbarkeit

Ein Produktionssystem gilt in dieser Arbeit, entsprechend *Kapitel 5.2.11*, als rekonfigurierbar, sofern eine physische Veränderungsfähigkeit der eingesetzten Ressourcen mit Auswirkungen auf die Systemfunktionalität möglich ist. Durch vordefinierte Systemschnittstellen können aufwandsarme Umrüstungen einzelner Systemkomponenten durchgeführt werden.

6.4.3 Verständnis von Wandlungsfähigkeit

Ein Produktionssystem gilt in dieser Arbeit, entsprechend *Kapitel 5.2.17*, als wandlungsfähig, sofern zum Zeitpunkt der Produktionsprogrammplanung bekannte als auch unbekannte Produkte durch die eingesetzten Ressourcen produziert werden können. Wandlungsfähige Systeme sind daher durch die Aspekte der Modularität, Universalität, Skalierbarkeit und weiteren anpassungsfähig zu gestalten, um eine Systemeignung für viele Produkte zu gewährleisten.

6.5 Anforderungen an die charakteristischen Vorgehensmodelle

In diesem Kapitel werden die Anforderungen erläutert, die für alle charakteristischen Vorgehensmodelle in dieser Arbeit gleichermaßen gelten. Die in diesem Kapitel formulierten Anforderungen richten den Fokus auf den grundlegenden Aufbau und Voraussetzungen für eine Verwendung der charakteristischen Vorgehensmodelle in dieser Arbeit.

Die charakteristischen Vorgehensmodelle müssen, in ihrer abgeleiteten Form, dem Aufbau des allgemeinen Vorgehensmodells entsprechen. Das Grundgerüst der charakteristischen Vorgehensmodelle muss demnach der Struktur eines V-Modells gleichen. Die konkreten inhaltlichen Aspekte können unter den charakteristischen Vorgehensmodellen differenzieren.

Die charakteristischen Vorgehensmodelle sind, wie das allgemeine Vorgehensmodell, als Werkzeuge der Produktionssystementwicklung einzuordnen. Dadurch sind alle inhaltlichen Aspekte der charakteristischen Vorgehensmodelle als Entwicklungstätigkeiten gekennzeichnet. Das bedeutet auch, dass die charakteristischen Vorgehensmodelle nicht zur Verifizierung oder Validierung von vor- oder nachgelagerten Aspekten in angrenzenden Phasen der Produktionsentstehung dienen.

Mit den Ergebnissen der Konzeptphase während der Produktionssystemplanung sind die zu erarbeitenden Systemcharakteristiken festgelegt. Das hat zur Folge, dass die Konzeptphase nicht nur einen maßgeblichen Einfluss auf die Systemcharakteristik des zukünftig existierenden Produktionssystems nimmt, sondern gleichzeitig auch das zu verwendende charakteristische Vorgehensmodell festlegt.

Bei der Formulierung der ebenen-orientierten Anforderungen müssen sowohl die Definitionen der Charakteristiken, als auch die Möglichkeiten der Modellbildung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme berücksichtigt werden, um die übergeordneten Ziele dieser Arbeit erfüllen zu können.

Nachfolgend werden die Vorgehensmodelle für die Systemcharakteristiken Flexibilität, Rekonfigurierbarkeit und Wandlungsfähigkeit vorgestellt. Die übergeordnete Zielstellung in dieser Arbeit ist die Berücksichtigung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme innerhalb des Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme. Der Prozess der virtuellen

Inbetriebnahme konkretisiert vor allem die Vorgehensschritte der Systemintegrationsphase. Die Vorgehensschritte der Systementwurfsphase sind bereits inhaltlich stark durch die Ergebnisse der Produktionsplanungsphase geprägt. Aus diesem Grund wird der Fokus zur Beschreibung der nachfolgenden charakteristischen Vorgehensmodelle auf die Systemintegrationsphasen gerichtet. Die Systementwurfsphase wird stark zusammengefasst vorgestellt und hinsichtlich der jeweiligen Charakteristiken punktuell konkretisiert.

6.6 Vorgehensmodell für flexible Produktionssysteme

6.6.1 Systementwurfsphase für flexible Produktionssysteme

Sofern unterschiedliche Produkte eines Produktionsprogrammes durch den Einsatz derselben und einmalig geplanten Produktionsressourcen produziert werden sollen, ergibt sich ein Bedarf an produktionsseitiger Flexibilität. Das notwendige Maß an produktionsseitiger Flexibilität wird von der Varianz der Produktmerkmale und -strukturen beeinflusst. In den Produktstrukturen sind daher variantentreibende Architekturen zu identifizieren. Eine ausführliche Beschreibung zur Identifizierung von Produktvarianten liefern (*Burggräf et al., 2021, S. 172-173*). Mit den identifizierten Produktmerkmalen und -strukturen können die nachgelagerten Aspekte auf Prozess-, Operations- und Funktionsebene konkretisiert werden. Während auf der Prozessebene ein Technologiemix und auf der Operationsebene eine Varianz der geometrischen Produktstrukturen zu einem erhöhten Flexibilitätsbedarf führen, liefert die, in flexiblen Produktionssystemen einmalig festgelegte, Systemfunktionalität die Grundlage zur Identifizierung von Ressourcen der zukünftigen Produktion.

6.6.2 Datenbeschaffung und -organisation für flexible Produktionssysteme

Der Prozess der Datenbeschaffung und -organisation im charakteristischen Vorgehensmodell für flexible Produktionssysteme folgt der Gliederung und inhaltlichen Vorgehensweise des allgemeinen Vorgehensmodells. In der logischen Abfolge wird demnach zunächst eine interne und externe Datenidentifizierung und -beschaffung zum Aufbau eines Datenbestandes durchgeführt. Daran anknüpfend wird der Datenbestand auf inhaltliche Konsistenz geprüft oder projektorientiert aufbereitet.

6.6.3 Systemintegrationsphase für flexible Produktionssysteme

Die Systemintegrationsphase beginnt mit der Ressourcenbestimmung und ihrer geometrischen Verifikation durch die Verwendung organisierter und modellierter CAD-Geometriemodelle. Gegenüber dem allgemeinen Vorgehensmodell ergeben sich bei der Betrachtung eines flexiblen Produktionssystems keine signifikanten Ableitungsformen für das charakteristische Vorgehensmodell. Wird vorausgesetzt, dass die Produktion mehrerer Produkte mit größeren Ressourcenumfängen einhergeht, ergibt sich für diesen Schritt und gegenüber konventionellen Produktionssystemen ein erhöhter Modellierungsbedarf auf Ressourcenebene. Der Zusammenschluss mehrerer Ressourcen kann als eine Initialsystemkonfiguration definiert werden, die, während des Produktionsbetriebes, physisch nicht mehr verändert wird.

Auf Funktionsebene werden kinematische Wirkketten den Geometriemodellen zunächst zugeordnet und anschließend definiert. Dadurch sind die Aufgaben während der Funktionsentstehung maßgeblich von den Umfängen der Geometriemodelle abhängig. Für die Betrachtung von flexiblen Produktionssystemen entstehen im charakteristischen Vorgehensmodell auf Funktionsebene besondere Anforderungen, infolge erhöhter Modellierungsanforderungen auf der Ressourcenebene. Darüberhinausgehende Auswirkungen auf der Funktionsebene und innerhalb des charakteristischen Vorgehensmodells für flexible Produktionssysteme sind nicht Teil der Betrachtungen in dieser Arbeit.

Während der Operationsentstehung in flexiblen Produktionssystemen werden zunächst der Operationstyp und anschließend die Operationsgeometrie definiert. Letztere gliedert sich in eine variable Teilgeometrie und eine konstante Teilgeometrie. Mittels variabler Teilgeometrien werden vor allem Geometrievarianzen zwischen den Produkten im Produktionsprogramm adressiert. Konstante Teilgeometrien dienen dazu, ressourcenseitige Initialoperationen abzubilden. Gemeinsam mit dem definierten Operationstyp wird die Operationsgeometrie in flexiblen Produktionssystemen einer Ressource und einer Produktstruktur dediziert zugeordnet.

Prozesse können aus einer oder mehreren Operationen, auch Operationsgruppen, bestehen. Ersteres führt zu einer dedizierten Zuordnung zwischen Ressourcen, Operationen und Produktstrukturen. Operationsgruppen führen zu einer Kombination von Operationstypen und einer Abhängigkeit zwischen den Operationsgeometrien. In flexiblen Produktionssystemen

können aus Operationsgruppen bestehende Prozesse Einfluss auf die Ressourcenkonfiguration nehmen. Damit bestimmt die Systeminitialkonfiguration in flexiblen Produktionssystemen die Flexibilität der zukünftig eingesetzten Ressourcen. In *Abbildung 6.6-1* werden die Arbeitsinhalte während der Modellentstehung flexibler Produktionssysteme eingeordnet.

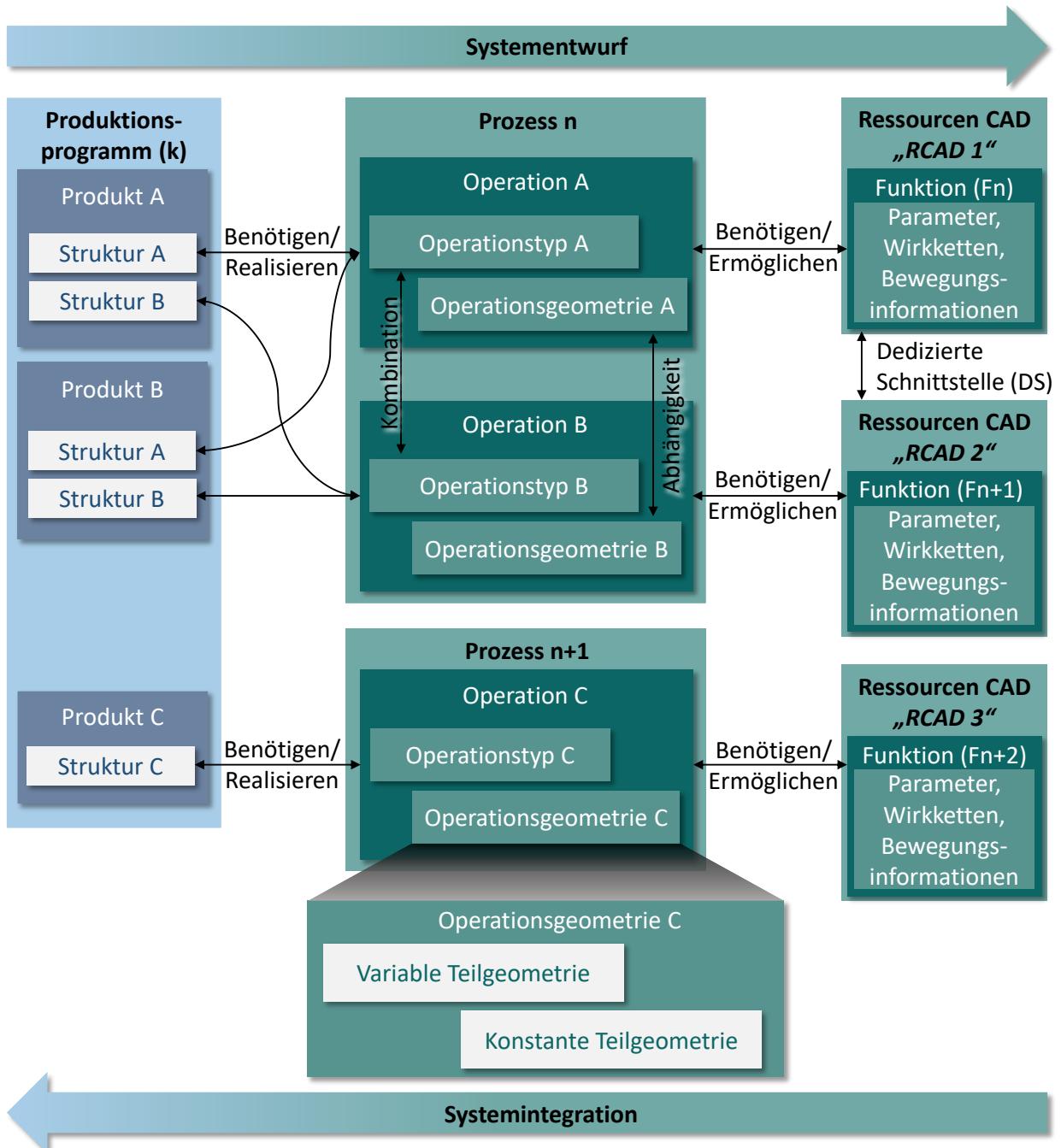


Abbildung 6.6-1. Beispielhafte Darstellung einer virtuellen Inbetriebnahme-gerechten Prozesszerlegung mit dedizierter Operations-Ressourcen-Produktstrukturzuordnung für flexible Produktionssysteme.

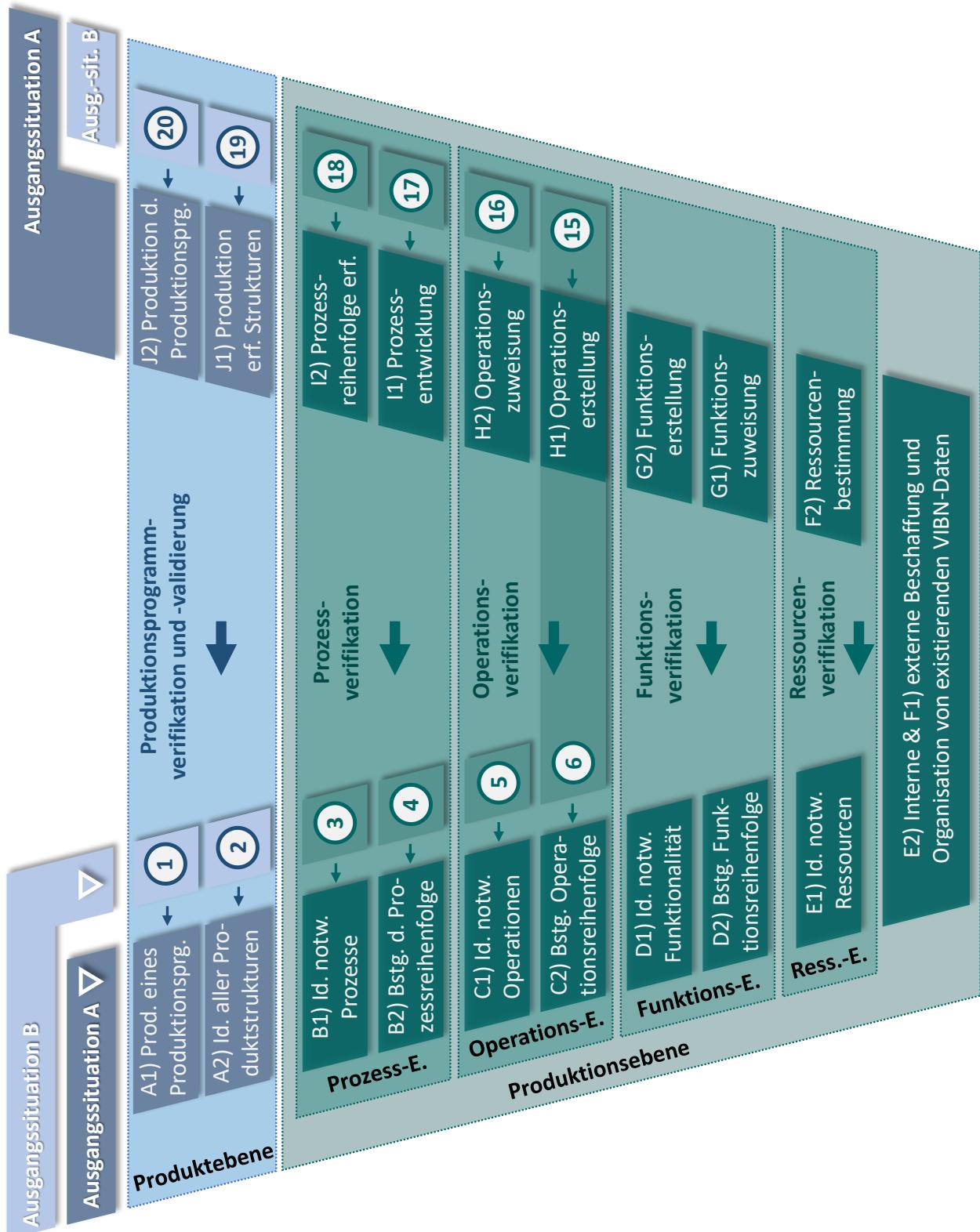
6.6.4 Turbulenzhandhabung in flexiblen Produktionssystemen

In dieser Arbeit wird die Betrachtung von Turbulenzen im Umfeld der Produktion auf die Einführung neuer Produkte begrenzt. Entsprechend der Definition der Flexibilität in *Kapitel 5.2-4* und des Flexibilitätsverständnisses in *Kapitel 6.4.1*, können die eingesetzten Ressourcen flexibler Produktionssysteme unter bestimmten Voraussetzungen auch neue und zum Zeitpunkt der Produktionsplanung nicht existente Produkte produzieren. Die Erfüllung dieser Voraussetzungen kann, durch die Einnahme einer zweiten Perspektive, auch Ausgangssituation B, im charakteristischen Vorgehensmodell für flexible Produktionssysteme mit den Möglichkeiten einer virtuellen Inbetriebnahme bewertet werden. Die Ausgangssituation B wird in *Abbildung 6.6-2* durch ein zweites V-Modell visualisiert und besteht systementwurfsseitig aus den Vorgehensschritten 1-6 und systemintegrationsseitig aus den Vorgehensschritten 15-20. Eine durchgängige Nummerierung der Vorgehensschritte wird vermieden, um charakteristische Vorgehensmodelle, durch eine einheitliche numerische Einteilung der Vorgehensschritte, im Rahmenwerk kombinieren zu können.

Die inhaltlichen Aspekte der Vorgehensschritte 1-6 und 15-20 gleichen den Vorgehensschritten A1-C2 und H1-J2 der Ausgangssituation A mit der Ausnahme einer bereits existenten Produktion und den daraus gewonnenen Erfahrungswerten, infolge der Vorgehensmodellverwendung. Diese Erfahrungswerte dienen im zweiten V-Modell zur Identifizierung von produktseitigen Merkmalen, die Abweichungen gegenüber den bisherigen Produktstrukturen aufweisen. Die Auswirkungen auf die nachgelagerten Produktionsebenen können analog der Vorgehensschritte in Ausgangssituation A erarbeitet und gegenüber der existenten Produktion verifiziert werden.

Im Kontext der Definition und des Verständnisses einer existenten flexiblen Produktion können nach einer neuen Produkteinführung lediglich logische Veränderungen am Produktionssystem selbst vorgenommen werden. Logische Änderungen umfassen beispielsweise Aspekte des Steuerungsprogrammes, das im charakteristischen Vorgehensmodell auf Prozessebene erarbeitet wird. Eine Steuerungsprogrammänderung kann direkte Auswirkungen auf die Operationsgeometrie haben. Dadurch sind Änderungen auch auf der Operationsebene nach erfolgtem Produktionsstart möglich. Veränderungsmöglichkeiten auf der Funktionsebene werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Es wird in dieser Arbeit vielmehr vorausgesetzt, dass die Wirkketten der Ressourcen bereits in der Systemintegrationsphase der Ausgangssituation A

die äußersten geometrischen und parametrisierten Rahmenbedingungen der eingesetzten Ressourcen erfüllen. Änderungen an den Geometriemodellen auf der Ressourcenebene werden nicht berücksichtigt, da die Definition keine physische Änderung der Ressourcen zulässt.



6.7 Vorgehensmodell für rekonfigurierbare Produktionssysteme

6.7.1 Systementwurfsphase für rekonfigurierbare Produktionssysteme

In rekonfigurierbaren Produktionssystemen können sich ändernde Anforderungen, durch ein gezieltes Umrüsten einzelner Ressourcen oder Ressourcenbestandteile, mit Auswirkungen auf die Systemfunktionalität, adressiert werden. Welche Ressource in welcher Art und Weise mit welcher Ausgangs- und Zielfunktionalität zu rekonfigurieren ist, wird bereits in der Produktionsplanungsphase konzeptionell bestimmt. Die Ergebnisse aus der Phase der Produktionsplanung können innerhalb des charakteristischen Vorgehensmodells während der Systementwurfsphase präzisiert werden. Ausgehend vom Produktionsprogramm, werden zunächst alle bekannten Produktstrukturen analysiert und notwendige Produktionsprozesse abgeleitet. Von wesentlicher Bedeutung für die Entwicklung rekonfigurierbarer Produktionssysteme ist die Identifizierung der Bedarfe an Prozesstypen, infolge der Produktstrukturvarianzen. Werden innerhalb eines Produktionsprogrammes wechselnde Prozesstypen benötigt, kann dies zu einer zusätzlichen Notwendigkeit einer Rekonfiguration führen. Basierend auf den identifizierten Prozesstypen können die notwendigen Operationstypen und Operationsgeometrien sowie die Systemfunktionalität konzeptionell bestimmt werden. Die Ergebnisse auf Prozess-, Operations- und Funktionsebene dienen, während des letzten Schrittes der Systementwurfsphase, der Identifizierung notwendiger Produktionsressourcen. Die Ressourcen können anschließend, unter Berücksichtigung der systemischen Schnittstellen, in verschiedene Systemkonfigurationen eingeordnet werden. Die ressourcenseitigen Zusammensetzungen der verschiedenen Systemkonfigurationen, zwischen denen rekonfiguriert werden kann, sind Teil der Ergebnisse der Produktionsplanungsphase.

6.7.2 Datenbeschaffung und -organisation für rekonfigurierbare Produktionssysteme

Im Anschluss an die Systementwurfsphase sind die Daten der als notwendig identifizierten Ressourcen zu beschaffen. Dabei ist zunächst die Feststellung der Existenz und der Verfügbarkeit von Modelldaten für alle Systemkonfigurationen und anschließend deren Bezug aus unternehmensinternen und -externen Bezugsquellen das wesentliche Ziel der Datenbeschaffung. Dem Aufbau des Modelldatenbestandes folgen eine projektbezogene Datenbestandsprüfung und eine projektbezogene Datenaufbereitung in Vorbereitung auf die Systemintegrationsphase.

6.7.3 Systemintegrationsphase für rekonfigurierbare Produktionssysteme

Im ersten Schritt der Systemintegrationsphase für rekonfigurierbare Produktionssysteme werden die Geometriemodelle aller Ressourcen für jede Systemkonfigurationen modelliert. Ein besonderer Fokus ist auf die geometrische Verifizierung der umrüstbaren Ressourcen und ihrer dedizierten Schnittstellen zu richten. Es kann hilfreich sein, während dieses Prozesses die geometrischen Ressourcenmodelle in entsprechend zu definierende Systemkonfigurationen zu klassifizieren. Ob dabei eine ganze Produktionslinie oder ein Teilbereich einer Produktionszelle in Systemkonfigurationen gegliedert wird, ist vom geplanten Umfang der virtuellen Inbetriebnahme abhängig. Zusätzlich zu den Systemkonfigurationen können konfigurationsneutrale Ressourcen definiert werden, die als fester Bestandteil jeder Systemkonfiguration gelten.

In *Abbildung 6.7.1* gilt das Ressourcenmodell „RCAD 2“ als konfigurationsneutral, wohingegen die Ressourcenmodelle „RCAD 1“ und „RCAD 2“ den Systemkonfigurationen „ m “ und „ $m+1$ “ zugeordnet sind. Am Beispiel der *Abbildung 6.7-1* ist ein Wechsel zwischen zwei Systemkonfigurationen, durch ein virtuelles Umrüsten der Ressourcenmodelle „RCAD 1“ und „RCAD 2“ mit Auswirkungen auf die Ressourcenfunktionalität möglich. Die Geometriemodelle aller Ressourcen für jede Systemkonfiguration werden anschließend, durch die Definition kinematischer Wirkketten, funktionalisiert. Auf der Funktionsebene bilden die Ressourcen- und Funktionsgruppen die kinematischen Rahmenbedingungen als Grundlage für den folgenden Schritt, der Operationserstellung. Die Operationen werden für rekonfigurierbare Produktionssysteme konfigurationsbasiert erarbeitet. Das hat zur Konsequenz, dass die Operationstypen und -geometrien in der Simulationsumgebung konfigurationsorientiert zugeordnet und verwaltet werden können. Die Operationen werden auf Prozessebene gebündelt. Die Entscheidung, welche Operationen auf der Prozessebene miteinander kombiniert werden können, wird maßgeblich von den Systemkonfigurationen und den darin eingeordneten Funktionsgruppen beeinflusst. Wie in flexiblen Produktionssystemen, führen Operationskombinationen zur Darstellung virtueller Produktionsprozesse auch in der Betrachtung von rekonfigurierbaren Produktionssystemen, zu einer Abhängigkeit zwischen den Operationsgeometrien. Die Operationsgeometrien sind zunächst konfigurationsbasiert zu erarbeiten und in variable und konstante Teilgeometrien zu gliedern. Die konstanten Operationsteilgeometrien können teilweise konfigurationsübergreifend verwendet werden. Im

letzten Schritt der Systemintegrationsphase wird die virtuelle Inbetriebnahme des eingesetzten rekonfigurierbaren Produktionssystems durchgeführt und dient maßgeblich der Bewertung, ob die durch das Produktionsprogramm definierten Anforderungen an das Produktionssystem virtuell verifiziert und validiert werden können. Die in diesem Kapitel erläuterten Arbeitsinhalte sind nachfolgend in Abbildung 6.7-1 beispielhaft dargestellt.

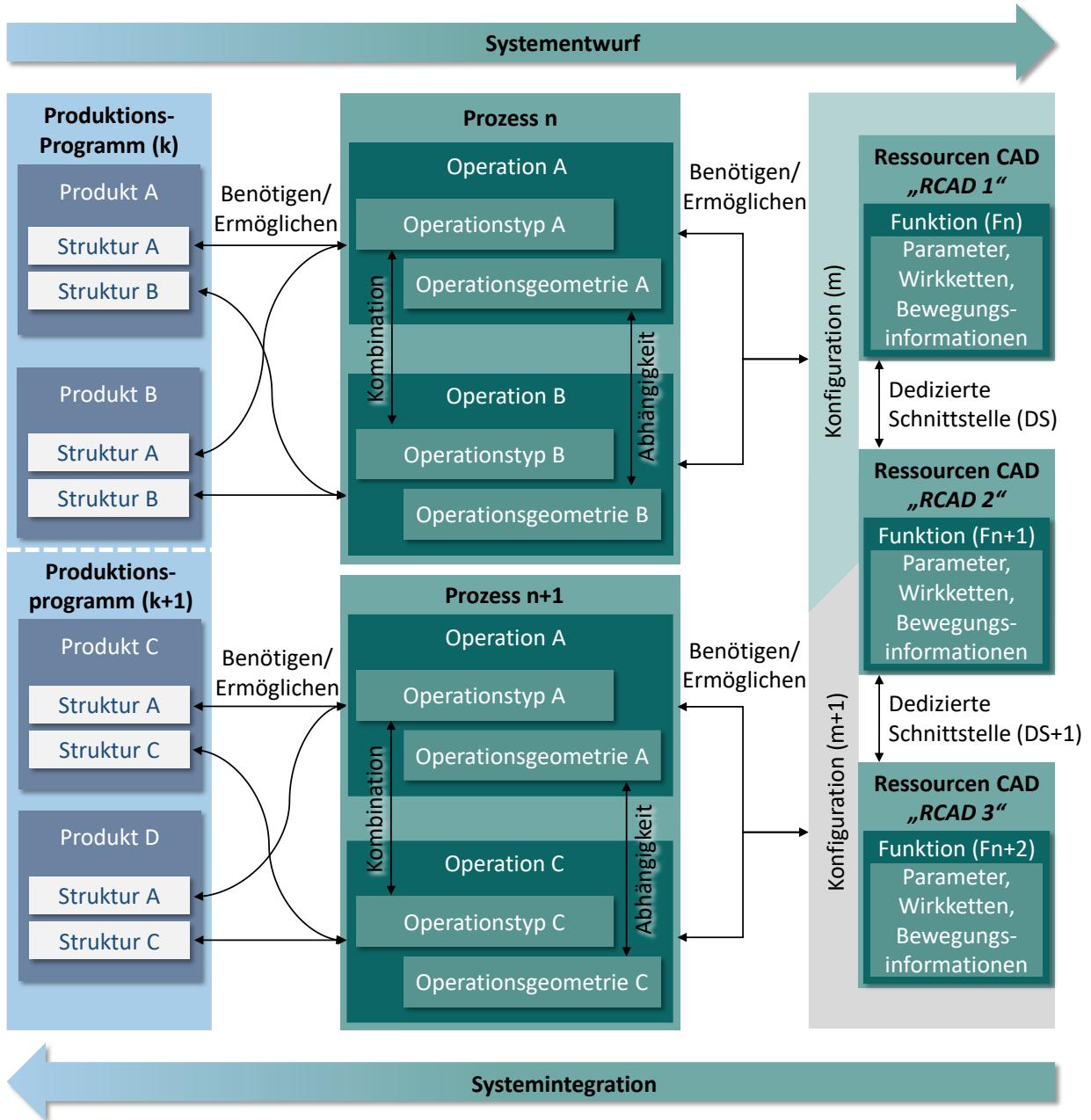


Abbildung 6.7-1. Beispielhafte Darstellung einer virtuellen Inbetriebnahme-gerechten Prozesszerlegung mit konfigurationsbasierter Operations- und Ressourcenzuordnung für rekonfigurierbare Produktionssysteme.

6.7.4 Turbulenzhandhabung in rekonfigurierbaren Produktionssystemen

Der Kernaspekt in rekonfigurierbaren Produktionssystemen ist die Möglichkeit zur kurzfristigen Umrüstung von Ressourcen oder Ressourcenbestandteilen zur Anpassung der Systemfunktionalität an sich ändernde Anforderungen im Umfeld der eingesetzten Ressourcen. In dieser Arbeit richtet sich der Fokus auf Anforderungen, die im Zusammenhang mit der Einführung eines neuen Produktes in eine existierende Produktionsumgebung stehen. Ob das existierende rekonfigurierbare Produktionssystem auch die Anforderungen des neuen Produktes erfüllen kann, soll mit den Möglichkeiten der virtuellen Inbetriebnahme im charakteristischen Vorgehensmodell bewertet werden.

Dazu wird eine zweite Perspektive, auch Ausgangssituation B, in Form eines zweiten V-Modells in das charakteristische Vorgehensmodell integriert. Die Vorgehensschritte dieses zweiten V-Modells gliedern sich systementwurfsseitig in die Schritte 1-8 und systemintegrationsseitig in die Schritte 13-20. Die konkreten Arbeitsinhalte dieser Schritte gleichen den Inhalten der Vorgehensschritte der Ausgangssituation A mit dem wesentlichen Unterschied eines bereits existenten Produktionssystems. Aus diesem Grund werden innerhalb der Vorgehensschritte der Ausgangssituation B ausschließlich architektonische Modellaspekte für rekonfigurierbare Produktionssysteme in zusammengefasster Form nachfolgend erläutert.

Die eingesetzten Ressourcen können, entsprechend des Verständnisses von rekonfigurierbaren Produktionssystemen, logisch und physisch verändert werden. Während logische Veränderungen auf der Prozess- und der Operationsebene durch Arbeiten am Steuerungsprogramm und dem Systemverhalten umgesetzt werden, können physische Veränderungen durch das Umrüsten von Ressourcen oder Ressourcenbestandteilen erzielt werden. Diese Rekonfiguration der eingesetzten Ressourcen setzt in dieser Arbeit voraus, dass die Ausgangs- und die Zielkonfigurationen zum Zeitpunkt der Produktionsplanungsphase erarbeitet sind. Das bedeutet, dass alle eingesetzten Ressourcen jeder geplanten Systemkonfiguration zwar geometrisch erarbeitet sind, jedoch in ihrer Systemfunktionalität angepasst werden können. Dadurch sind Änderungen an rekonfigurierbaren Produktionssystemen, infolge einer Einführung neuer Produkte, teilweise auch auf der Funktionsebene erforderlich. Aufgrund der vollständigen Erarbeitung aller eingesetzten Ressourcen jeder Systemkonfiguration, existieren bereits vor Produktionsbeginn alle

ressourcenseitigen geometrischen Modelldaten. Eine geometrische Veränderung der Modelldaten auf der Ressourcenebene entfällt. In Abbildung 6.7-2 ist das V-Modell zur Turbulenzhandhabung in rekonfigurierbaren Produktionssystemen dargestellt.

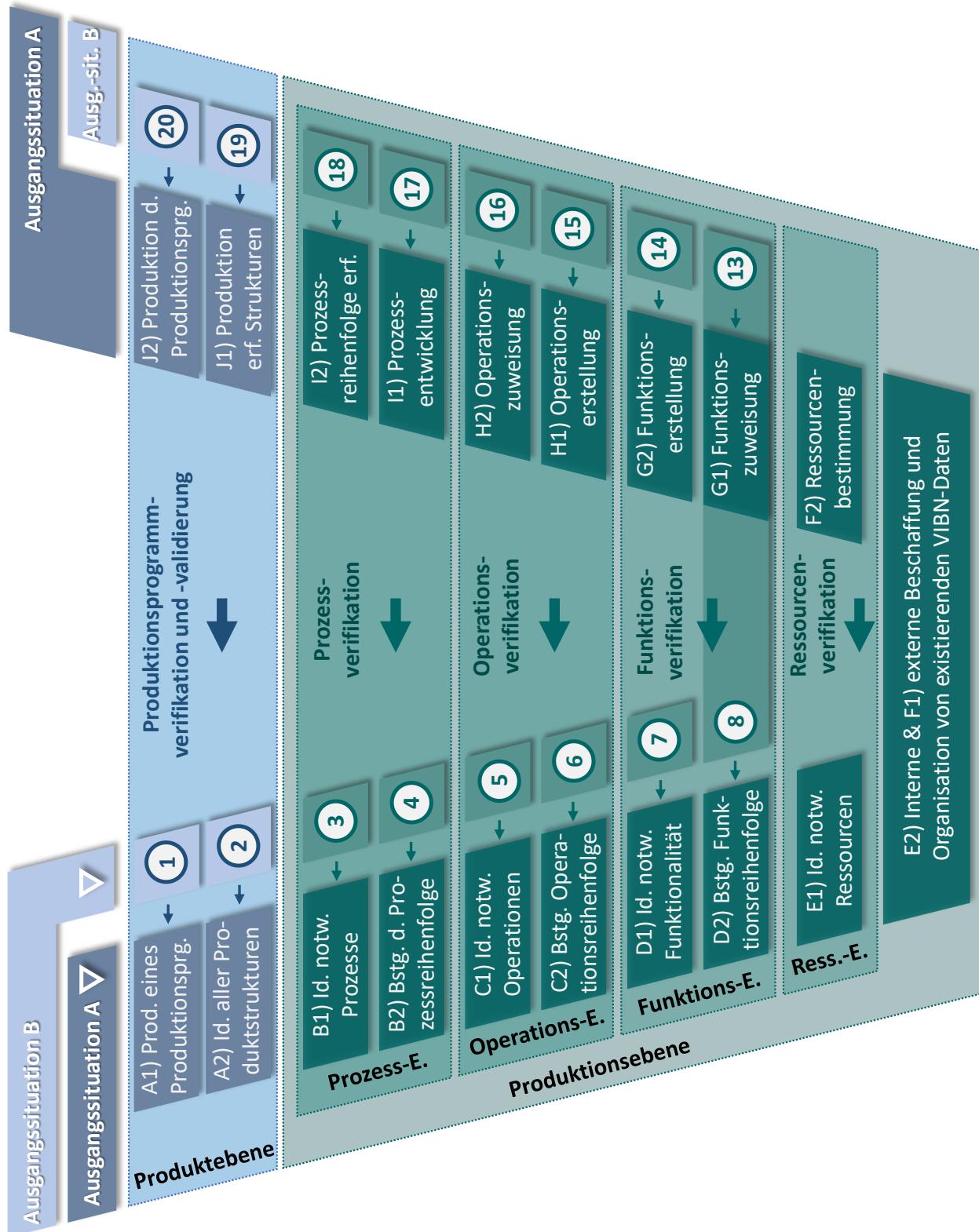


Abbildung 6.7-2. Turbulenzhandhabung in rekonfigurierbaren Produktionssystemen.

6.8 Vorgehensmodell für wandlungsfähige Produktionssysteme

6.8.1 Systementwurfsphase für wandlungsfähige Produktionssysteme

Wandlungsfähige Produktionssysteme sind nach dem Begriffsverständnis und der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Definition dazu in der Lage, zum Zeitpunkt der Produktionsplanung bekannte, aber auch teilweise oder vollständig unbekannte, Produkte zu produzieren. Die Produktionssysteme weisen, getrieben durch den Unbekanntheitsgrad der betrachteten Produkte, einen erhöhten logischen und physischen Veränderungsbedarf auf. Die Identifizierung dieses Veränderungsbedarfs seitens der zukünftig eingesetzten Produktionssysteme oder zumindest Systembestandteilen, ist die Aufgabe der Produktionsplanung. Mit den Ergebnissen der Produktionsplanung steht damit die Entscheidung, ob ein gesamtes Produktionssystem oder gezielte Bestandteile davon wandlungsfähig entwickelt werden. In dieser Arbeit werden ausschließlich Bestandteile eines Produktionssystems betrachtet, da die vorgestellten Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme im Rahmenwerk, anhand eines Produktionssystems, kombiniert werden.

Im ersten Schritt der Systementwurfsphase gilt es, innerhalb eines Produktionsprogrammes eingeordnete Produkte auf ihre Produktstrukturen zu analysieren. In den Produktstrukturen bereits bekannter Produkte sind variantentreibende Merkmale zu identifizieren. Darüber hinaus können bereits bekannte und teilweise bekannte Produktstrukturen noch nicht vollständig existenter Produkte in die Strukturanalyse einfließen. Die Ergebnisse der Produktionsplanungsphase, über die geplanten Produktionsprogramme und lokalisierten notwendigen wandlungsfähigen Bereiche der zukünftigen Produktion, können die Strukturanalysen punktuell ergänzen. Auf Basis der identifizierten Produktstrukturen können im zweiten und dritten Schritt zunächst grundsätzlich benötigte Prozesse abgeleitet und anschließend in Operationen gegliedert werden. Die Gesamtheit aller Operationen definiert die Rahmenbedingungen der notwendigen Systemfunktionalität, die im Anschluss erarbeitet wird und die Grundlage zur Analyse der benötigten Ressourcen liefert. Vor dem Hintergrund einer wandlungsfähigen Produktion sind die notwendigen Ressourcen während der Systementwurfsphase konzeptionell und im Sinne einer Wandlungsbefähigung zu erarbeiten. Wesentliche Zielgrößen können dabei modulare Ressourcenstrukturen sein, die skalierungsfähig sind und beispielsweise durch ihre universellen Schnittstellen kompatible und austauschbare Einheiten mit anderen Ressourcenmodulen bilden.

6.8.2 Datenbeschaffung und -organisation für wandlungsfähige Produktionssysteme

Die Phase der Datenbeschaffung und -organisation für wandlungsfähige Produktionssysteme folgt inhaltlich den Vorgehensschritten des allgemeinen Vorgehensmodells. Während der Datenbeschaffung können die Schnittstellen aller bezogenen Ressourcendaten für eine konzeptionelle Bewertung ihrer Kompatibilität dienen. In der Phase der Datenorganisation können projektbezogene Schnittstellenkonzepte, nach Bedarf und in Ergänzung der Vorgehensschritte des allgemeinen Vorgehensmodells, erarbeitet werden.

6.8.3 Systemintegrationsphase für wandlungsfähige Produktionssysteme

Die Systemintegration beginnt auf der Ressourcenebene mit der geometrischen Verifikation aller modellierten und organisierten Ressourcen sowie deren Schnittstellen untereinander und gegenüber der Systemperipherie. Daran anknüpfend werden die geometrischen Ressourcen funktionalisiert. Die auf Funktionsebene definierten Wirkketten, können ressourcenübergreifend definiert werden und konkretisieren die geometrischen Schnittstellen zwischen den eingesetzten Ressourcen. Darüber hinaus können auf der Funktionsebene Maßnahmen für Modulskalierungen vorbereitet werden. Die Grundlage für eine Integration zusätzlicher Ressourcen oder Module wird durch die Definition einheitlicher Wirkketten gelegt. Auf der Operationsebene dienen die Systemfunktionalitäten zur Erarbeitung der Operationstypen und Operationsgeometrien. Auch in wandlungsfähigen Produktionssystemen sind die Operationstypen stark an die Systemfunktionalitäten der Ressourcen gebunden und die Operationsgeometrien in variable und konstante Operationsgeometrien gegliedert. Letztere können aufgrund ihrer Konstanz weiter untergliedert werden. Es empfiehlt sich, die Untergliederung der Teiloperationen entsprechend der definierten Module vorzunehmen. Dadurch können die geometrisch-funktionalen Merkmale der Ressourcen mit den operativen Aspekten modular in der virtuellen Entwicklungsumgebung definiert und verwaltet werden. Auf der Prozessebene werden die Operationen zunächst gebündelt und dienen dann der gesamtheitlichen Darstellung aller Produktionsprozesse. Ein wesentlicher Aspekt der Prozessebene ist die Softwareprogrammerstellung. Das Softwareprogramm ist auf Grundlage der modularen Produktionssystemarchitektur zu erarbeiten und dient auf der Produktebene zur Verifikation und Validierung der, während der Systementwurfsphase definierten, Anforderungen. Die in diesem Kapitel erläuterten Arbeitsinhalte sind nachfolgend in *Abbildung 6.8-1* beispielhaft dargestellt.

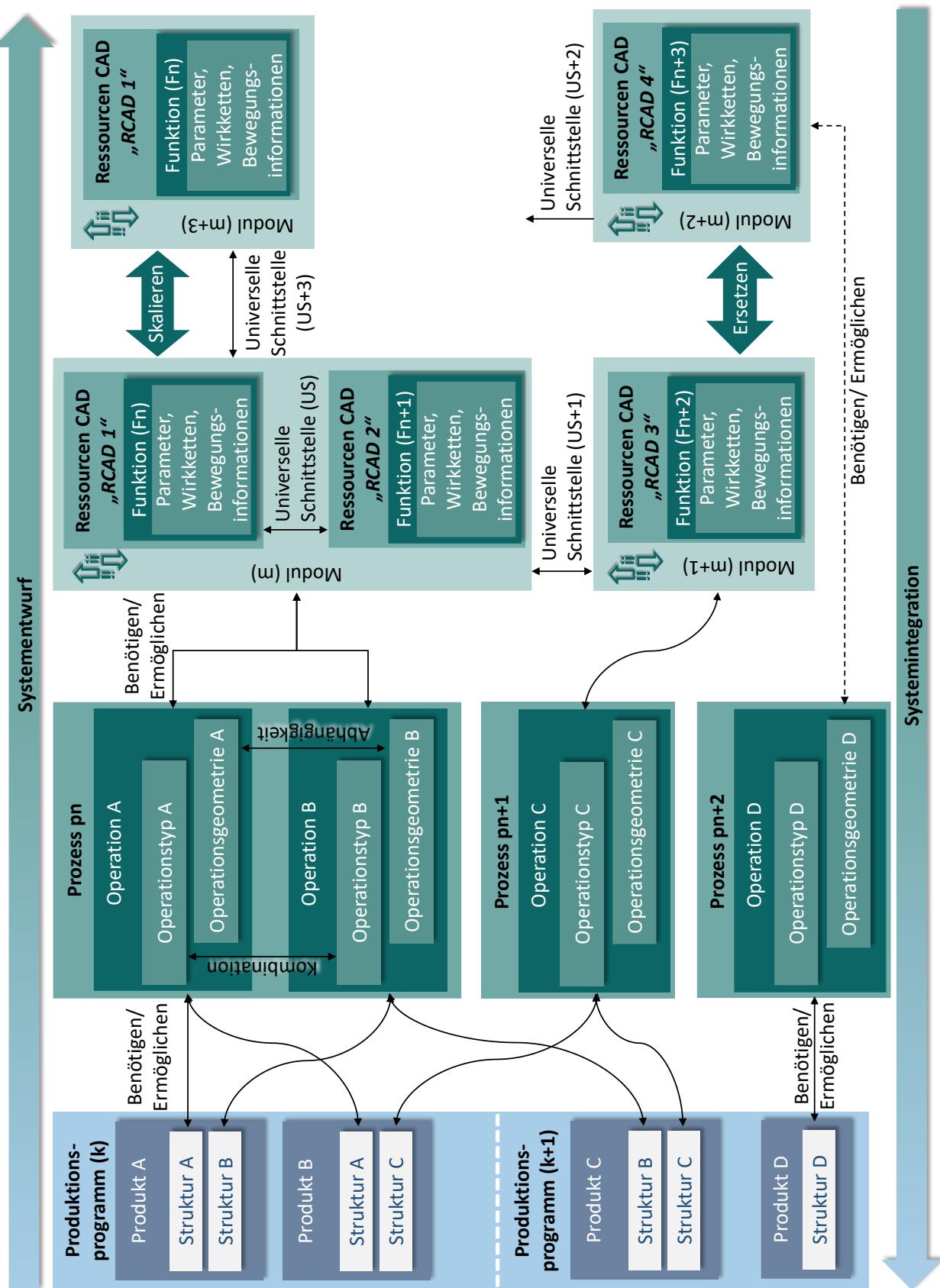


Abbildung 6.8-1. Beispielhafte Darstellung einer virtuellen Inbetriebnahme-gerechten Prozesszerlegung mit modulbasierter Operations- und Ressourcenzuordnung für wandlungsfähige Produktionssysteme.

6.8.4 Turbulenzhandhabung in wandlungsfähigen Produktionssystemen

Im Zentrum des Einsatzes von wandlungsfähigen Produktionssystemen steht die Herausforderung, definierte wie auch undefinierte Produkte eines Produktionsprogrammes mit den Möglichkeiten einer logisch und physisch veränderbaren Produktion zu produzieren. Die Einführung eines neuen Produktes kennzeichnet den in dieser Arbeit gesetzten Fokus aller, im Umfeld von Produktionen auftretenden, Turbulenzen. Wandlungsfähige Produktionssysteme gelten, durch ihre modularen Systemstrukturen und universellen Schnittstellen, bereits als veränderungsfähig. Die Möglichkeiten der Veränderungen eines wandlungsfähigen Produktionssystems, infolge der Einführung eines neuen Produktes, sollen im Kontext des charakteristischen Vorgehensmodells für wandlungsfähige Produktionssysteme mit den Möglichkeiten einer virtuellen Inbetriebnahme nachfolgend bewertet werden.

Die Grundlage zur Bewertung der Veränderungsmöglichkeiten von wandlungsfähigen Produktionssystemen legt eine zweite Perspektive im charakteristischen Vorgehensmodell, die als ein eingeschobenes zusätzliches V-Modell eine zweite Ausgangssituation, auch Ausgangssituation B, kennzeichnet. Innerhalb dieser zweiten Ausgangssituation sollen, die an die existierenden Produktionssysteme gestellten, Anforderungen, infolge der Einführung eines neuen Produktes, konkretisiert werden und in die Produktionsentwicklung einfließen. Entlang der Systementwurfsphase präzisieren die Vorgehensschritte 1-9 die inhaltlichen Aspekte, gefolgt von einer Datenbeschaffungs- und Datenorganisationsphase in den Vorgehensschritten 10 und 11 sowie der Systemintegrationsphase in den Vorgehensschritten 12-20.

Aufgrund der Definition und des Verständnisses der Wandlungsfähigkeit in dieser Arbeit können Veränderungen sowohl logisch als auch physisch erfolgen. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass die zukünftig eingesetzten Produktionssysteme in der Ausgangssituation B, zum Zeitpunkt der Ausgangssituation A, noch nicht erarbeitet wurden. Dadurch können bisher nicht eingesetzte und nicht erarbeitete Ressourcen, durch eine modulare Struktur mit universellen Schnittstellen in die existierende Produktion eingebunden werden. Für das charakteristische Vorgehensmodell bedeutet das eine Möglichkeit zur Veränderung des Produktionssystems auf allen Ebenen, beginnend auf der Produktebene und entlang aller Produktionsebenen. Auch eine Beschaffung und Organisation von Daten erstmalig eingesetzter und erarbeiteter Ressourcen ist Teil des eingeschobenen Vorgehensmodells, infolge der Einführung eines neuen Produktes. Dadurch

ergeben sich für den Einsatz der virtuellen Inbetriebnahme zusätzlich Veränderung auf der Ressourcenebene und allen folgenden Ebenen. In *Abbildung 6.8-2* ist das V-Modell zur Turbulenzhandhabung in wandlungsfähigen Produktionssystemen dargestellt.

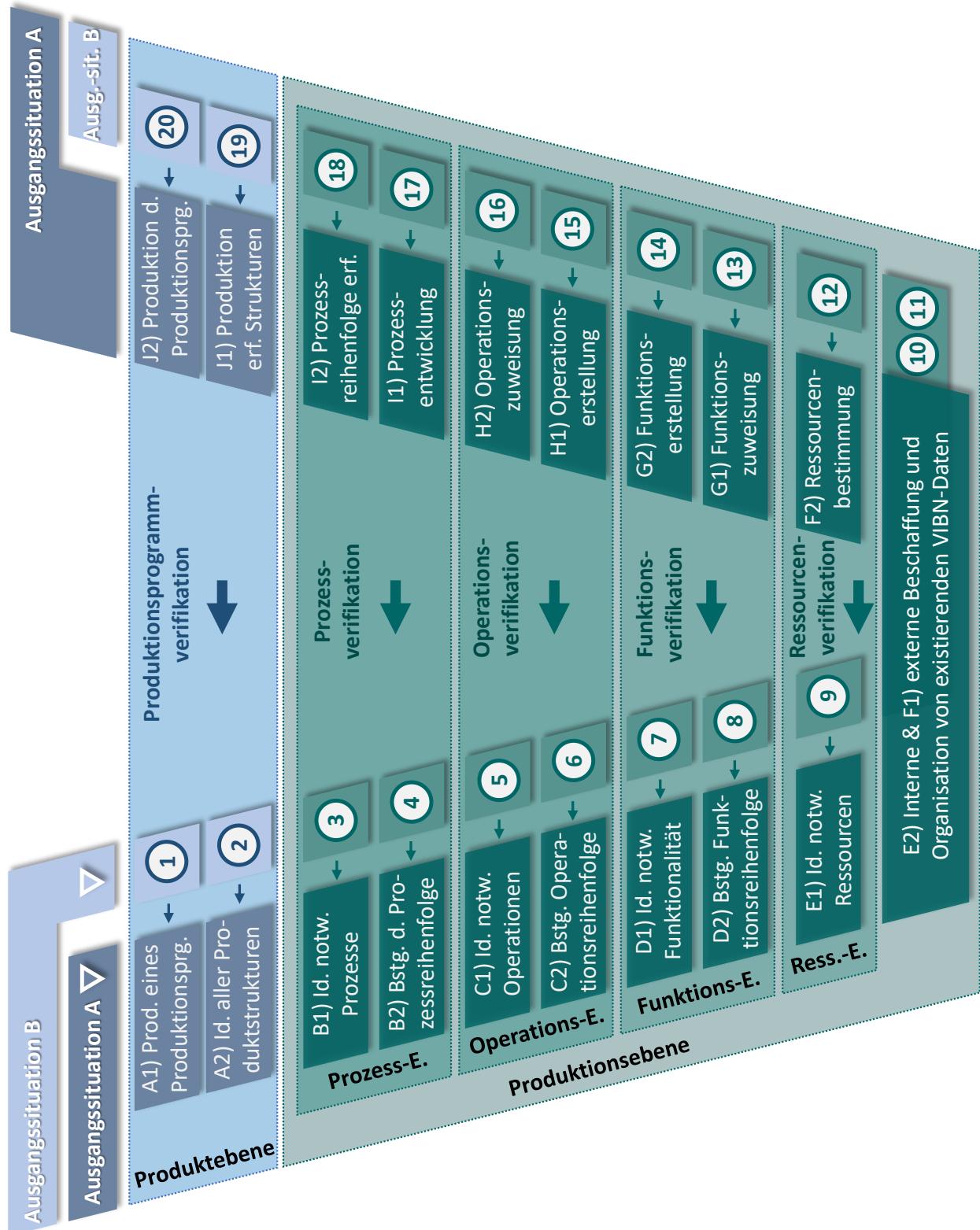


Abbildung 6.8-2. Turbulenzhandhabung in wandlungsfähigen Produktionssystemen.

6.9 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Vorgehensmodelle zur Berücksichtigung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme innerhalb des gesamten Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme vorgeschlagen.

Das Kapitel beginnt mit einer Diskussion von Anforderungen, die den Aufbau, den Einsatz und die Einordnung der Vorgehensmodelle im Produktionsentstehungsprozess konkretisieren. Daran anknüpfend wurde ein allgemeines Vorgehensmodell vorgestellt. Das allgemeine Vorgehensmodell entspricht dem grundlegenden Aufbau eines V-Modells und gliedert sich in die drei Phasen des Systementwurfs, der Datenbeschaffung- und Datenorganisation und der Systemintegration. Die drei Phasen durchlaufen produktorientierte und produktionsorientierte Ebenen, die den Aufbau der betrachteten Produktionssysteme strukturiert präzisieren. Im Wesentlichen wurden zwei Ausgangssituationen berücksichtigt. Die erste Ausgangssituation beschreibt die Tätigkeitsinhalte während einer Produktionsneuentwicklung. Die zweite Ausgangssituation fokussiert die Tätigkeitsinhalte im selben Vorgehensmodell, infolge der Einführung eines neuen Produktes. Das allgemeine Vorgehensmodell dient zunächst dem Verständnis der grundlegenden Architekturen aller in dieser Arbeit vorgestellten Vorgehensmodelle anhand einer charakterneutralen Beschreibung der Arbeitsinhalte. Darüber hinaus wurde der gesamte Prozess der virtuellen Inbetriebnahme, ausgehend von der Modellierung bis zur Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme im allgemeinen Vorgehensmodell, eingeordnet und schafft so ein gesamtheitliches projekt- und charakterneutrales Modellverständnis.

Im zweiten Teil des Kapitels wurden aus der in *Kapitel 5* identifizierten Menge an Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme die Flexibilität, die Rekonfigurierbarkeit und die Wandlungsfähigkeit für die Ableitungen charakteristischer Vorgehensmodelle herangezogen. Die Architekturen der charakteristischen Vorgehensmodelle folgen dem Aufbau des allgemeinen Vorgehensmodells. Sie konkretisieren die wesentlichen Arbeitsinhalte auf Produkt- und Produktionsebene auf Basis der vorgeschlagenen Charakteristik-Definitionen in *Kapitel 5*. Zur Erarbeitung der Produktionssysteme wurden die Möglichkeiten der virtuellen Inbetriebnahme diskutiert, mit denen sowohl die Anforderungen während einer Produktionsneuentwicklung als auch die wesentlichen Arbeitsinhalte, infolge der Einführung neuer Produkte in existierende Produktionsumgebungen adressiert werden.

7 Rahmenwerk

Das *siebte Kapitel* umfasst die Erarbeitung eines Rahmenwerks, welches zur kombinierten Betrachtung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme dient. Im ersten Schritt wird das Verständnis des Rahmenwerks in dieser Arbeit erläutert. Daran anknüpfend werden Turbulenzen im Umfeld der Produktion vorgestellt und gegenüber den Reaktionsmöglichkeiten der, in Kapitel sechs vorgestellten, Produktionscharakteristiken eingeordnet. Anschließend werden die Charakteristiken in einer kombinierten Form als Ergebnis eines integrierten Vorgehensmodells erläutert, bevor die Ergebnisse dieses Kapitels zusammengefasst werden.

7.1 Verständnis des Rahmenwerks

Das Rahmenwerk versteht sich als übergeordnetes Gesamtkonstrukt und bündelt die, in Kapitel sechs vorgestellten, Vorgehensmodelle zur virtuellen Inbetriebnahme von cyber-physischen Produktionssystem-Charakteristiken. Das Rahmenwerk vereint dabei die erarbeiteten Kenntnisse der vorgelagerten Kapitel in einem gesamtheitlichen Vorgehensmodell. Der Kernaspekt dieses gesamtheitlichen Vorgehensmodells ist die Möglichkeit zur Kombination von cyber-physischen Produktionssystem-Charakteristiken in einem Produktionssystem, entsprechend der übergeordneten Zielstellung dieser Arbeit. Während in Kapitel sechs Vorgehensmodelle für voneinander isoliert betrachtete Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme vorgestellt worden sind, werden die Charakteristiken in diesem Kapitel in ein gemeinsames Vorgehensmodell integriert. Die Grundlage dieses integrierten Vorgehensmodells bilden demnach die, in *Kapitel 6* erarbeiteten, charakteristischen Vorgehensmodelle. Wie die charakteristischen Vorgehensmodelle, orientiert sich auch das integrierte Vorgehensmodell an der Grundstruktur des allgemeinen Vorgehensmodells. Es berücksichtigt die Möglichkeiten der Modellbildung und Durchführung einer physikfreien virtuellen Inbetriebnahme zur virtuellen Verifizierung und Validierung definierter Produktionssystemanforderung aus der Systementwurfsphase. Das Rahmenwerk ist Bestandteil der Produktionsentwicklungsphase und nutzt, wie die charakteristischen Vorgehensmodelle, die Ergebnisse der Produktionsplanungsphase zur Konkretisierung der inhaltlichen Aspekte aller Vorgehensschritte. Das Rahmenwerk dient Anwendern der virtuellen Inbetriebnahme als ergänzendes sowie entwicklungsbegleitendes Werkzeug und erhebt dadurch keinen Ersatzanspruch auf etablierte Prozeduren der Produktionsentwicklung.

7.2 Turbulenzen im Umfeld industrieller Produktionssysteme

Während der Produktionsentstehung und des Produktionsbetriebes herrschen interne und externe Turbulenzen im Umfeld industrieller Produktionsunternehmen. Durch Reaktionsstrategien kann diesen Turbulenzen unternehmensseitig entgegengewirkt werden. In dieser Arbeit sind die Flexibilität, die Rekonfigurierbarkeit und die Wandlungsfähigkeit Teil wesentlicher Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme und kennzeichnen die zentralen Reaktionsstrategien im turbulenten Umfeld industrieller Produktionen. In diesem Kontext werden nachfolgend in der wissenschaftlichen Literatur diskutierte Turbulenzen im Umfeld industrieller Produktionen stark zusammengefasst vorgestellt und anschließend gegenüber den, in dieser Arbeit betrachteten, Charakteristiken als Reaktionsstrategien beispielhaft eingeordnet.

7.2.1 Turbulenzklassifizierung

In einem Großteil der wissenschaftlichen Literatur besteht ein Konsens über die Existenz von internen und externen Turbulenzen im Umfeld von industriellen Produktionsunternehmen. In einer sehr umfassenden interdisziplinären und teilweise auch kritischen Betrachtung des Turbulenzbegriffes ordnet (Hoeschen, 2015, S. 77-108) die Aspekte der „*Varianz, Fremdheit, und Durchlaufzeit*“ als turbulenztreibende Komplexitätsfaktoren gegenüber „*Turbulenzdämpfern*“ ein. Der Autor diskutiert verschiedenste Arbeiten über die Zusammensetzung von turbulenzgeprägten Produktionsumfeldern. In diesem Zusammenhang sind nach (Dill, 2003, S. 1) zunehmende Produktindividualisierungen, steigender Kostendruck, maximale Kundenorientierung sowie die Globalisierung des Wettbewerbs Beispiele wesentlicher Herausforderungen für industrielle Produktionsunternehmen (Hoeschen, 2015, S. 91). In (Wiendahl, 2002b, S. 27 & 56) werden diese Herausforderungen durch heterogene Auftrags- und Lieferzeitanforderungen oder Änderungen technischer Spezifikationen als Beispiele externer Turbulenzkeime ergänzt. Dem gegenüber stehen Aspekte interner Turbulenztreiber, die durch Zieländerungen auf Managementebene oder organisatorische und technische Störungen beschrieben werden können (Wiendahl, 2002b, S. 56; Hoeschen, 2015, S. 93). In der Arbeit von (Westkämper & Löffler, 2016, S. 50-55) werden diese Turbulenzen als, auf die Produktion einwirkende, Megatrends zusammengefasst und beinhalten zusätzlich Aspekte der Nachhaltigkeit und Standards im Wissens- und Informationsmanagement.

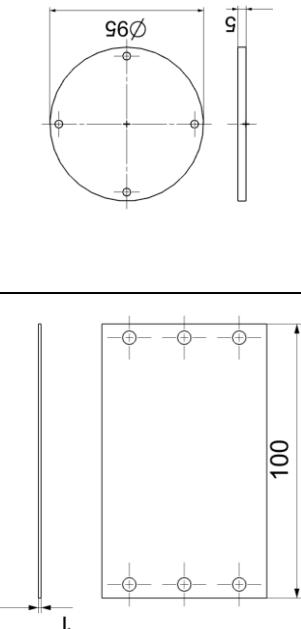
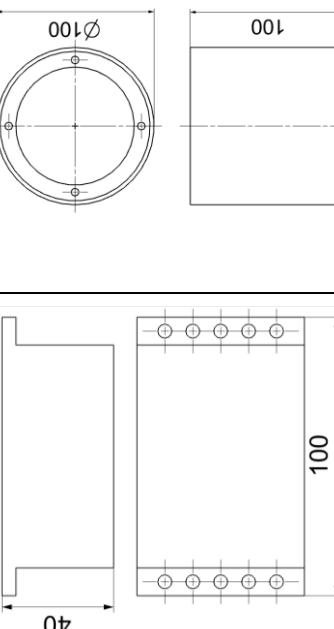
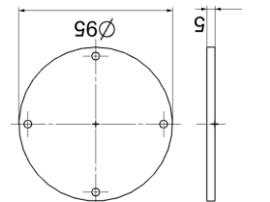
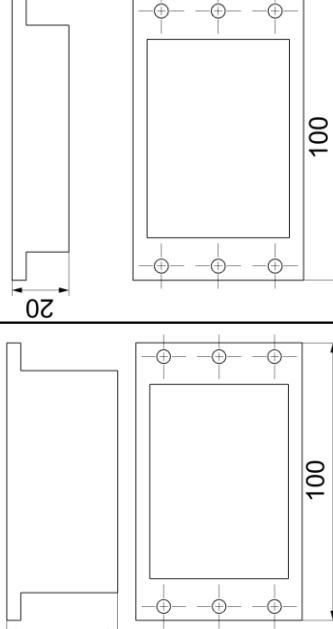
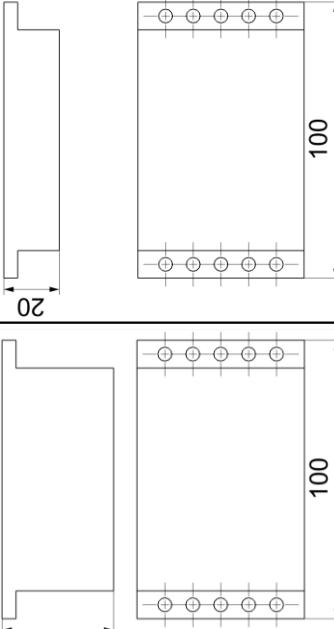
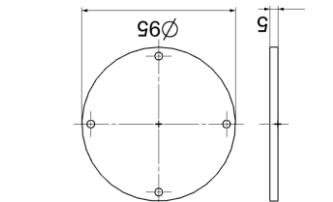
7.2.2 Reaktionsstrategien

Die im *Kapitel 7.2.1* vorgestellten Turbulenzen im Umfeld industrieller Produktionssysteme führen zu einem unternehmensseitigen Reaktionsbedarf, infolge volatiler Umfeldbedingungen. Mit den ausgewählten Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme, also der Flexibilität, der Rekonfigurierbarkeit und der Wandlungsfähigkeit, werden in dieser Arbeit drei verschiedene Reaktionsstrategien diskutiert. Unter einer Reaktionsstrategie wird in dieser Arbeit eine geplante produktionsseitige Reaktionsfähigkeit auf eintretende Turbulenzen verstanden. Die Ausprägung dieser Reaktionsfähigkeit wird maßgeblich von der geplanten Reaktionsstrategie, als Folge der Wahl der Produktionssystemcharakteristik, beeinflusst. Nachfolgend sollen die Reaktionsstrategien, während der Einführung neuer Produkte in existierende flexible, rekonfigurierbare und wandlungsfähige Produktionen, beispielhaft diskutiert werden.

Zur Beschreibung der Reaktionsstrategien, wird nachfolgend ein vereinfachter Anwendungsfall aus der Montage von Gehäuseschalen skizziert. Der in diesem Anwendungsfall betrachtete Prozess umfasst die Montage einer Gehäuseoberschale auf eine Gehäuseunderschale durch einen Roboter mit mechanischem Greifwerkzeug zur Handhabung der Gehäuseoberschalen. Während die Gehäuseunderschale auf einem Werkstückträger durch die Montagelinie gefördert wird, befindet sich die Gehäuseoberschale in einem Speichermedium, das der Bereitstellung der Oberschalen dient. Anhand dieses Szenarios, als Bestandteil eines existierenden Produktionssystems (Ausgangssituation B), werden nachfolgend die verschiedenen Möglichkeiten der Reaktionsstrategien, infolge der Einführung neuer Produkte, diskutiert.

In flexiblen Produktionssystemen können die eingesetzten Ressourcen, also der Roboter und der montierte mechanische Greifer, zwar in ihrer logischen, jedoch nicht in ihrer physischen Struktur, verändert werden. Für alle Anwendungsfälle flexibler Produktionssysteme ist es demnach entscheidend, ob mit der Einführung eines neuen Produktes die initial bestimmten Prozess- und Operationstypen sowie die Systemfunktionalität und die dadurch initial eingesetzten Ressourcen beibehalten werden können. Für den in diesem Kapitel geschilderten Anwendungsfall wird die Einführung eines neuen Gehäuses, mit einer veränderten Geometrie der Gehäuseschalen, in drei Szenarien diskutiert, die in der nachfolgenden *Tabelle 7.2-1* zusammengefasst dargestellt sind.

Tabelle 7.2-1. Szenarien-basierte Produktänderungen.

Ausgangsbasis	Produktneueinführung infolge von Produktänderungen			Wandlungsfähigkeit
	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	
CPPS-Charakteristik	Flexibilität	Rekonfigurierbarkeit	Produktneueinführung infolge von Produktänderungen	Andereungsparameter
Gehäuse-oberhälfte				Mech. und pneumatisches Handhaben, Verschrauben Handhaben, Verschrauben, Kleben, Schweißen Änderung der Gehäusegeometrie und Fügetechnologie
Gehäuse-unterhälfte				Mechanisches und pneumatisches Handhaben, Verschrauben Ersatz der Gehäuseoberschale durch eine Gehäuseplatte Logische und physisch geplante Änderungen
Prozessebene	Mechanisches Handhaben, Verschrauben	Mechanisches Handhaben, Verschrauben	Mechanisches und pneumatisches Handhaben, Verschrauben	Logische und physisch geplante Änderungen
Produktebene	-	-	Ersatz der Gehäusehälften	
Produktionsebene	-	-	-	

Im **ersten Szenario** unterscheiden sich die neuen Gehäuseschalen gegenüber den bisher montierten Gehäusen, durch eine geometrische Verkleinerung der Höhe beider Gehäuseschalen. Die Gehäuseunterschale kann mittels Werkstückträger weiterhin durch die Montagelinie gefördert werden, da die Höhenänderung keine Auswirkungen auf die Position der Aufnahmepunkte des Werkstückträgers hat. Die Gehäuseoberschale wird weiterhin durch einen Roboter mit mechanischem Greifer aus einem Speichermedium entnommen und auf die Gehäuseunterschale gesetzt. Durch die verkleinerten Gehäusehöhen ergibt sich ein potentieller Änderungsbedarf in der Operationsgeometrie, der durch logische Änderungen des Steuerungsprogrammes adressiert werden kann. Die Prozess- und Operationstypen ändern sich zunächst nicht. Das gleiche Ergebnis liegt für die Systemfunktionalität vor, wenn die neue Gehäuseoberschale weiterhin durch den mechanischen Greifer aufgenommen und auf die Unterschale gesetzt werden kann. In diesem ersten Szenario würde das neue Produkt, also das neue Gehäuse, durch ein flexibles Produktionssystem realisiert werden können.

Im **zweiten Szenario** wird von der gleichen Geometrieveränderung ausgegangen, jedoch mit dem Unterschied, dass die Gehäuseoberschale durch eine Gehäuseplatte mit einer Stärke von einem Millimeter ausgetauscht wird. Für die Gehäuseunterschale ergeben sich in diesem zweiten Szenario keinerlei Veränderungen. Für die Handhabungsprozesse der neuen Gehäuseplatte können veränderte Anforderungen an die Handhabungsprozesse entstehen. Sofern der mechanische Greifer nicht in der Lage ist, die Gehäuseplatte, aufgrund ihrer schmalen Außenkontur, aufzunehmen, kann ein funktionaler Änderungsbedarf entstehen, der lediglich in Kombination mit physischen Änderungen und außerhalb der Definition flexibler Produktionssysteme erfüllt werden kann.

Ist die Einführung der Gehäuseplatte bereits Bestandteil der Produktionsplanung, können, durch den Einsatz rekonfigurierbarer Produktionssysteme, auch Änderungsbedarfe auf funktionaler Ebene adressiert werden. Im zweiten Szenario der Änderung der Gehäuseoberschale in eine Gehäuseplatte können die veränderten Anforderungen des Handhabungsprozesses durch eine kurzfristige Umrüstung des mechanischen Greifers zu einem Vakuumgreifer erfüllt werden. Durch den Wechsel auf einen Vakuumgreifer verändert sich zudem, entsprechend der Definition rekonfigurierbarer Produktionssysteme, die Systemfunktionalität als Folge der Rekonfiguration. Eine Voraussetzung zur kurzfristigen Umrüstung der eingesetzten Greifer ist das Schnittstellenkonzept zwischen allen Systemkonfigurationen. In dem in diesem Kapitel

betrachteten Anwendungsfall bildet die Roboter-Greifer Schnittstelle eine dediziert entwickelte Konfigurationsschnittstelle und beschreibt eine gezielte Ausrichtung des Schnittstellenkonzepts auf die geplanten Systemkonfigurationen.

Sind die zukünftig zu produzierenden Produkte in ihrer Struktur und Geometrie gar nicht oder nicht vollständig erarbeitet, führt diese Wissenslücke zunächst zu einem Bedarf an wandlungsfähigen Produktionssystemen. Die Wandlungsfähigkeit der Produktion wird durch eine Modularisierung der eingesetzten Produktionsressourcen erzielt, die durch universelle Schnittstellen gegenüber anderen Produktionsressourcen und gegenüber der Produktionsperipherie eine umfassende Systemkompatibilität sicherstellen können. Die Systemkompatibilität ermöglicht eine kurzfristige logische aber auch physische Veränderung der Produktion. Die universellen Schnittstellen dienen als Grundlage zur zukünftigen Einführung neuer Produktionsressourcen, die ebenfalls durch einen modularen Aufbau mit universellen Schnittstellen gekennzeichnet sind.

Für den in diesem Kapitel geschilderten Anwendungsfall könnte das innerhalb eines **dritten Szenarios** bedeuten, dass beispielsweise auch Gehäuse montiert werden können, die sich in ihrer Geometrie und ihres Werkstoffes von den bisher betrachteten Produkten unterscheiden und nicht Teil der initialen Produktionsprogrammplanung sind. Wurden bisher ausschließlich quadratische oder rechteckige Gehäuse montiert, könnten zukünftig durch die Einführung neuer Ressourcenmodule auch runde Gehäuse montiert, verklebt oder verschweißt werden. In der Umsetzung können die wechselnden Produktionsanforderungen durch modulare Veränderungen der eingesetzten Werkstückträger, Förderlinien, Roboter und Werkzeuge erfüllt werden. Zusätzlich kann der Montageprozess der Gehäuseschalen modulbasiert skaliert werden. So können wechselnde Anforderungen in der Ausbringungsmenge der Gehäuse durch die Einbringung zusätzlicher Module punktuell adressiert werden.

Die in diesem Kapitel vorgestellten Reaktionsstrategien skizzieren die Reaktionsmöglichkeiten in einer flexiblen, rekonfigurierbaren und wandlungsfähigen Produktion auf die Einführung neuer Produkte in existierende Produktionssysteme. Dadurch können die Handlungsmöglichkeiten innerhalb der Ausgangssituation B, in allen vorgestellten Vorgehensmodellen, beispielhaft konkretisiert werden. Die Veränderungstiefen der jeweiligen Reaktionsstrategien sind in *Abbildung 7.2-1* dargestellt.

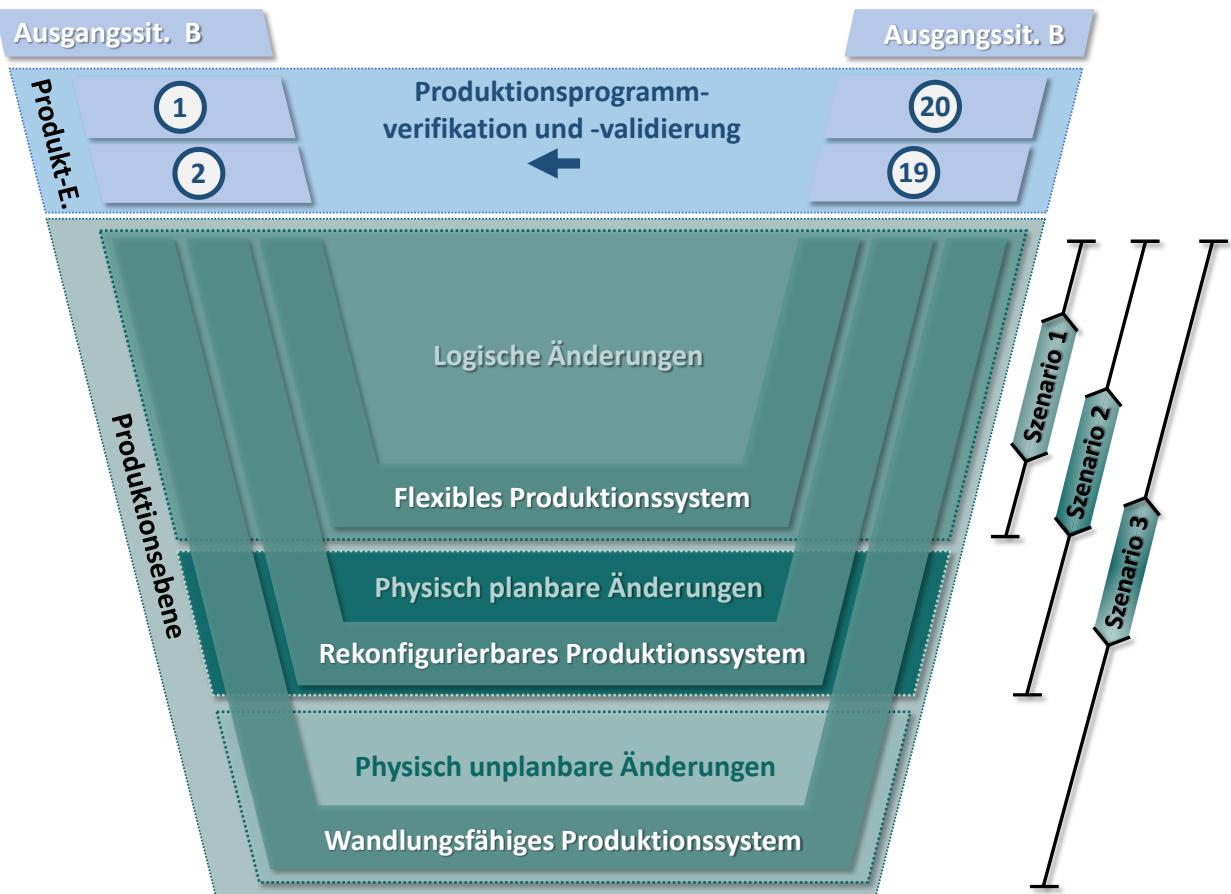


Abbildung 7.2-1. Veränderungstiefen der Reaktionsstrategien.

In flexiblen Produktionssystemen (Szenario 1) können die eingesetzten Ressourcen ausschließlich auf ihrer logischen Ebene, beispielsweise durch eine Veränderung des Steuerungsprogrammes, verändert werden. Eine Veränderung des Steuerungsprogrammes kann Auswirkungen auf die Operationsgeometrie haben, jedoch nicht auf den Operationstyp.

Rekonfigurierbare Produktionssysteme (Szenario 2) ermöglichen logische sowie physische Veränderungen der Produktionssysteme. Die wesentliche Voraussetzung ist, dass jede Konfiguration, also jede Ressourcenzusammensetzung, Bestandteil der Neuentwicklung der Produktion innerhalb der Ausgangssituation A ist. Dadurch ergibt sich eine Planbarkeit der physischen Veränderungsmöglichkeiten in rekonfigurierbaren Produktionssystemen.

In wandlungsfähigen Produktionssystemen (Szenario 3) besteht die Möglichkeit, ein existierendes Produktionssystem über diese Restriktion hinaus zu verändern. Die modulare Ressourcenstruktur und die Verwendung universeller Schnittstellen, erlauben eine nachträgliche

aufwandsarme Veränderung der verwendeten Ressourcen und Module. Dabei können auch Ressourcen zum Einsatz kommen, die nicht Bestandteil der Produktionsneuentwicklung zum Zeitpunkt der Ausgangssituation A sind, wenn sie ebenfalls der modularen Struktur entsprechen und über universelle Schnittstellen verfügen.

Im Gegensatz zu rekonfigurierbaren Produktionssystemen ergibt sich in wandlungsfähigen Produktionssystemen, unter den genannten Voraussetzungen, eine Ressourceneutralität für beide, in dieser Arbeit vorgestellten, Ausgangssituationen.

7.3 Integriertes Vorgehensmodell

Das integrierte Vorgehensmodell dient der kombinierten Betrachtung von Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme in einem gemeinsamen übergeordneten Rahmenwerk. Dazu werden innerhalb des, in dieser Arbeit vorgestellten, integrierten Vorgehensmodells, die charakteristischen Vorgehensmodelle der Flexibilität, der Rekonfigurierbarkeit und der Wandlungsfähigkeit gebündelt.

Das integrierte Vorgehensmodell folgt dem Aufbau des allgemeinen Vorgehensmodells und wird von zwei V-Modellen zur Beschreibung der Ausgangssituation A und der Ausgangssituation B durchlaufen. Es besteht, wie das allgemeine Vorgehensmodell, aus einer Produktebene sowie einer Produktionsebene, die in die Prozess-, Operations-, Funktions- und Ressourcenebene untergliedert ist. Das integrierte Vorgehensmodell ist ein Werkzeug der Produktionsentwicklung und wird zwischen der Produktionsplanungsphase und Produktionsrealisierungsphase eingeordnet.

Das integrierte Vorgehensmodell ist das Ergebnis der Kombination aller in dieser Arbeit vorgestellten charakteristischen Vorgehensmodelle. Alle charakteristischen Vorgehensmodelle werden durch die wesentlichen zwei Ausgangssituationen beschrieben und durchlaufen die gleiche, ebenen-orientierte Modellstruktur. In der Betrachtung der ersten Perspektive, also Ausgangssituation A, besteht in allen charakteristischen Vorgehensmodellen, trotz inhaltlicher Differenzen, die identische Abfolge der Vorgehensschritte. Dadurch können die V-Modelle der Ausgangssituation A von allen charakteristischen Vorgehensmodellen zusammengefasst und durch ein gemeinsames V-Modell repräsentiert werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Systemcharakteristiken und den daraus resultierenden Reaktionsstrategien ergeben sich für die Ausgangssituation B unterschiedliche V-Modell-Verläufe.

Entsprechend der Einordnung der Reaktionsmöglichkeiten, infolge der Einführung neuer Produkte in existierende Produktionsumgebungen in *Kapitel 7.2.2*, unterliegen die Vorgehensmodelle der Charakteristiken unterschiedlichen Veränderungstiefen. Während flexible Produktionssysteme ausschließlich auf der logischen Ebene verändert werden können, beinhalten rekonfigurierbare Produktionssysteme die Möglichkeit auch physisch planbare Änderungen vorzunehmen. In wandlungsfähigen Produktionssystemen sind zusätzlich ungeplante Veränderungen auf allen Ebenen Bestandteil der Reaktionsstrategie.

Trotz der unterschiedlichen Veränderungstiefen der charakteristischen Vorgehensmodelle, erlauben sie aufgrund ihrer einheitlichen Vorgehensweise eine gemeinsame einheitliche Einordnung im integrierten Vorgehensmodell in *Abbildung 7.3-1*.

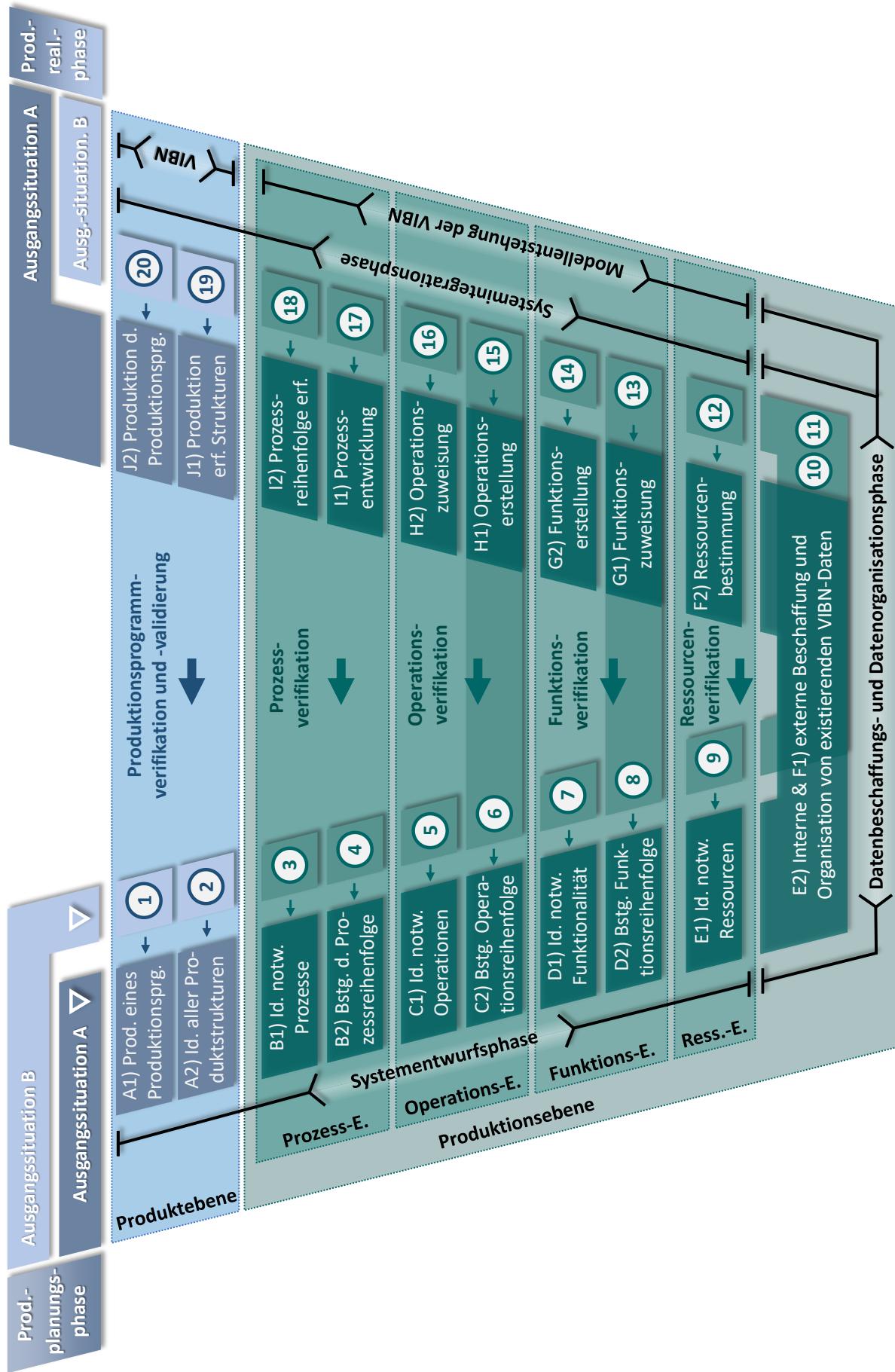


Abbildung 7.3-1. Rahmenwerk zur virtuellen Inbetriebnahme cyber-physischer Produktionen.

7.4 Zusammenfassung

Dieses Kapitel erläuterte das in dieser Arbeit geltende Rahmenwerk für die Modellierung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme, unter Berücksichtigung von kombinierten cyber-physischen Produktionssystem-Charakteristiken.

Im ersten Teil des Kapitels wurden Anforderungen an das Rahmenwerk formuliert, die im Wesentlichen dessen Aufbau und Einsatzzweck konkretisieren. Daran anknüpfend wurde die Einführung neuer Produkte in existierende Produktionsumgebungen als interne und externe Turbulenz im Umfeld industrieller Produktionen diskutiert. Die unternehmensexternen Reaktionsmöglichkeiten auf die Einführung neuer Produkte wurden im Rahmen von Reaktionsstrategien beispielhaft erläutert. Die Reaktionsstrategien basieren auf den in dieser Arbeit betrachteten Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme, also der Flexibilität, der Rekonfigurierbarkeit und der Wandlungsfähigkeit und umfassen verschiedene Ausprägungen der systemexternen Veränderungsfähigkeit.

Im zweiten Teil des Kapitels wurde das Rahmenwerk vorgestellt. Das Rahmenwerk bildet dabei ein übergeordnetes Gesamtgerüst und bündelt alle, in Kapitel sechs vorgestellten, charakteristischen Vorgehensmodelle in einem integrierten Vorgehensmodell. Das Rahmenwerk bietet durch sein integriertes Vorgehensmodell eine Möglichkeit, kombinierte Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme entlang des gesamten Prozesses der virtuellen Inbetriebnahme zu berücksichtigen und in die Entwicklungsarbeiten zukünftig existierender Produktionen zu integrieren.

8 Validierung

Kapitel acht beinhaltet die Validierung der, in dieser Arbeit vorgeschlagenen, Vorgehensmodelle. Hierzu werden zunächst die Ziele und inhaltliche Themenabgrenzungen diskutiert. Daran anknüpfend wird der Anwendungsfall vorgestellt, der zur Validierung des integrierten Vorgehensmodells im nachfolgenden Schritt dient. Eine Evaluierung der Ergebnisse der Validierung sowie eine inhaltliche Zusammenfassung schließen dieses Kapitel ab.

8.1 Ziele und Abgrenzung der Validierung

Das übergeordnete Ziel der Validierung in dieser Arbeit ist die anwendungsorientierte Bewertung der Durchführbarkeit des vorgeschlagenen integrierten Vorgehensmodells. Das integrierte Vorgehensmodell bündelt alle inhaltlichen Aspekte der charakteristischen Vorgehensmodelle und ermöglicht somit eine gesamtheitliche, aber bei Bedarf auch eine isolierte, Betrachtung aller Produktionssystemcharakteristiken. Als Grundlage der Validierung dient der Einsatz von Softwarewerkzeugen zur Modellierung und Durchführung einer virtuellen Inbetriebnahme. Das wesentliche Ziel dieser Validierung ist die Bewertung der Erfüllbarkeit der aufeinander aufbauenden Vorgehensschritte des integrierten Vorgehensmodells durch die Möglichkeiten der Teilprozesse, also der Modellierung und der Durchführung, der virtuellen Inbetriebnahme.

Die virtuelle Inbetriebnahme dient in erster Linie dazu, entwickelte Steuerungsprogramme gegenüber virtuellen Produktionssystemmodellen zu verifizieren und zu validieren. In dieser Arbeit wird die virtuelle Inbetriebnahme jedoch viel mehr dazu verwendet, inhaltliche Aspekte der Vorgehensschritte des integrierten Vorgehensmodells zu verifizieren. Zwar ist die Erarbeitung von Steuerungsprogrammen ein Teil des integrierten Vorgehensmodells, jedoch rückt die Validierung der Steuerungsprogramme im Gesamtkontext dieser Arbeit und dem integrierten Vorgehensmodell in den Hintergrund. Für die Validierung in dieser Arbeit werden physikfreie Simulationen und virtuelle Inbetriebnahme-Prozesse angestrebt. Den Nachweis einer Eignung des integrierten Vorgehensmodells auch für physikbasierte Simulationen wird in diesem Kapitel nicht erbracht. Der verwendete Demonstrator dient zur beispielhaften Beschreibung eines industrienahen Anwendungsfalls, ohne eine Überführung der virtuellen Ergebnisse auf den realen Demonstrator als Teil dieser Zielstellung zu formulieren. Die Validierung beschränkt sich auf die in Kapitel sechs ausgewählten Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.

8.2 Anwendungsfall

In einer Demonstratorfabrik am Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) in Saarbrücken befindet sich eine Prozesslinie zur automatisierten Unterbodenmontage von Verkleidungselementen an Fahrzeugunterböden. Die Prozesslinie ist das Ergebnis einer Fließprozessentstehung nach (Scholer, 2018, S. 117-163) und in Abbildung 8.2-1 dargestellt. Diese automatisierte Montagelinie besteht aus einem Tragwerk, einer linear verfahrenden Elektrohängelbahn sowie einer, parallel zur Elektrohängelbahn verfahrenden, Schwenkeinheit mit Roboter und montiertem Schraubwerkzeug. Die Schwenkeinheit, oder auch Transporteinheit, setzt sich aus einem Schlittensystem, zwei Schwenkarmen, einer Synchronisierungseinheit, einem Medienflansch sowie einer Ausgleichseinheit und einer dezentralen Steuerung zusammen (Scholer, 2018, 153-155). Durch die Elektrohängelbahn können Fahrzeuge aufgenommen und in unterschiedlichen Fahrzeugausrichtungen durch die Montagelinie verfahren werden. Die Schwenkeinheit ermöglicht über einen synchronisierten, parallelen Verfahrweg, gemeinsam mit dem Schraubroboter, eine automatisierte Montage der Unterbodenverkleidungen am Fahrzeug. Der automatisierte Montageprozess übernimmt einen Großteil manueller Überkopfarbeiten und trägt zur physischen Entlastung der Werker im Bereich der Fahrzeugendmontage bei. Eine detaillierte Beschreibung des Aufbaus und Prozesses findet sich in (Scholer, 2018, S. 117-163).



Abbildung 8.2-1. Reale Unterbodenmontagelinie in (Scholer, 2018, S. 162).

Die Prozesse der realen Unterbodenmontage dienen als Grundlage zur Validierung des integrierten Vorgehensmodells in einer virtuellen Entwicklungsumgebung, entsprechend Abbildung 8.2-2. Die virtuelle Unterbodenmontagelinie besteht, wie die reale Unterbodenmontagelinie, aus einem Tragwerk, Elektrohängelbahnen zur Förderung von Fahrzeugen, einer Schwenkeinheit mit Medienflansch, und einem Roboter mit montiertem Schraubwerkzeug. Darüber hinaus gehören der Medienflansch und eine Synchronisier- sowie eine Ausgleichseinheit zu den Umfängen der virtuellen Unterbodenmontagelinie. Die virtuellen Fahrzeugmodelle sind das Ergebnis einer Eigenkonstruktion, auf Basis von Rasterbildern, und werden ausschließlich zu schemenhaften Nachbildungszwecken in der Unterbodenmontagelinie verwendet. In der realen Unterbodenmontagelinie werden die Unterbodenverkleidungen durch einen Werker an das Fahrzeug vorverschraubt. Der Großteil des gesamten Schraubprozesses wird anschließend durch den Schraubroboter automatisiert realisiert. In dieser Arbeit wird auf die Darstellung der Belegschaft in der virtuellen Unterbodenmontagelinie verzichtet, um den Fokus auf die Validierung der Inhalte des integrierten Vorgehensmodells zu richten, in denen ausschließlich technologische Ressourcen berücksichtigt werden. Zur Erhöhung der Performanz der Simulationen und der virtuelle-Inbetriebnahme-Prozesse wird auf eine virtuelle Darstellung biegeflexibler Ressourcen, beispielsweise zur elektrischen Energieversorgung, verzichtet.

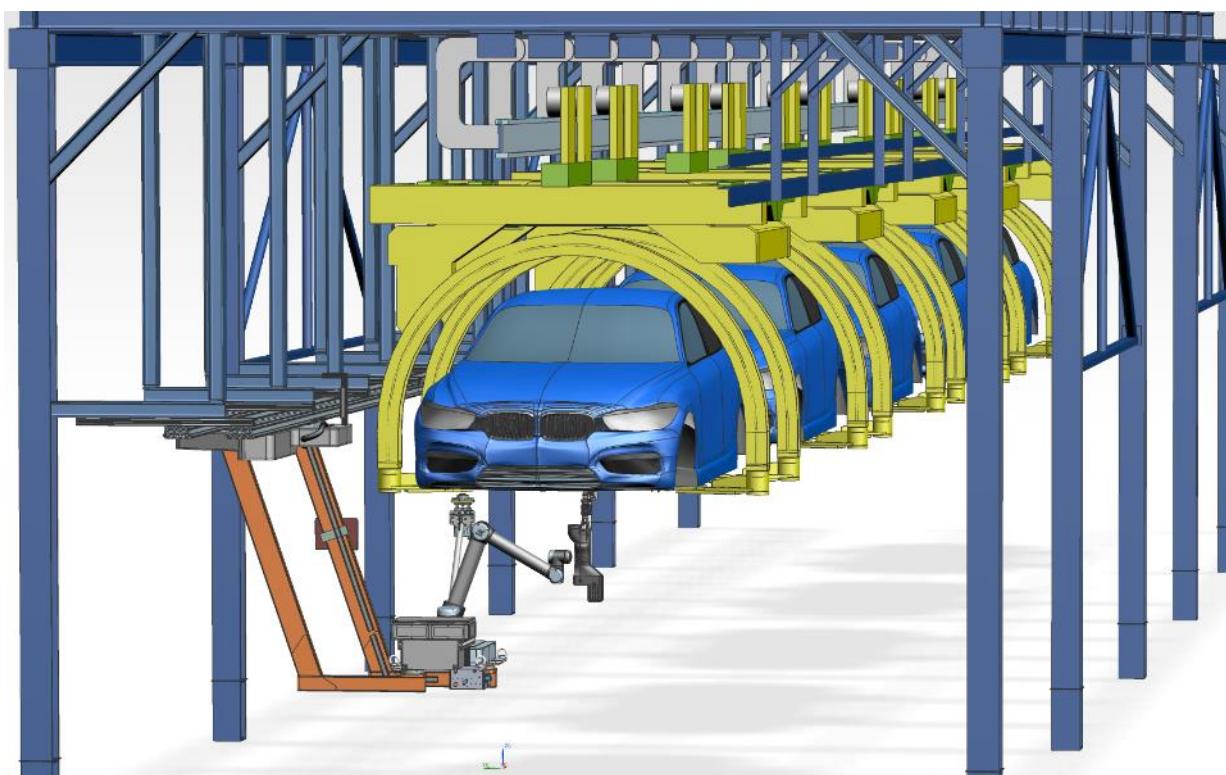


Abbildung 8.2-2. Virtuelle Unterbodenmontagelinie.

8.2.1 Produktbeschreibung

In dem geschilderten Anwendungsfall der Validierung werden bereits vorgesetzte Unterbodenverkleidungselemente an Fahrzeugunterböden, mittels eines automatisierten Schraubprozesses, montiert. Vorgesetzte Elemente umfassen in diesem Zusammenhang Verkleidungselemente, die bereits durch den Werker, der in der virtuellen Umgebung in dieser Arbeit nicht Bestandteil der Darstellungen ist, an das Fahrzeug vorverschraubt sind und sich somit bereits am Fahrzeugunterboden befinden. Die Geometrie und der Werkstoff können dabei neben der Anzahl der zu montierenden Verkleidungselemente je Fahrzeug stark variieren. In einer Übersicht der Verkleidungselemente am Fahrzeugunterboden in (Scholer, 2018, S. 124) und Abbildung 8.2-3 werden die aus Mischfaservlies bestehenden und formstabilen Elemente ausschließlich durch Schraubprozesse an das Fahrzeug montiert, siehe auch Abbildung 8.3-1.

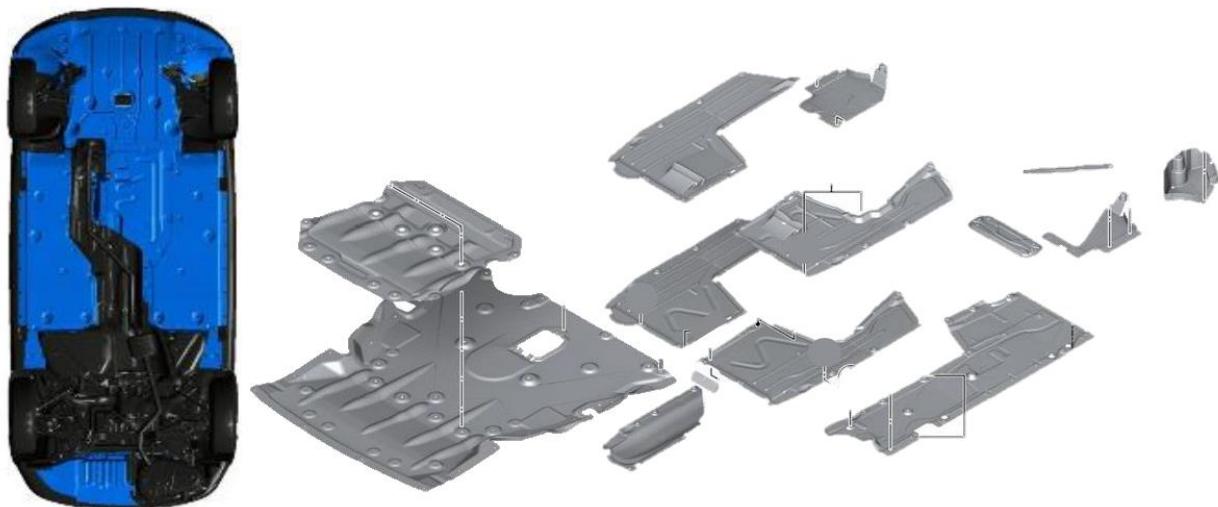


Abbildung 8.2-3. Beispiele von Verkleidungselementen am Fahrzeugunterboden in (Scholer, 2018, S. 124).

8.2.2 Prozessbeschreibung

Die Verkleidungselemente werden in dieser Arbeit in einer physikfreien, virtuellen Entwicklungsumgebung an den Fahrzeugunterboden montiert. Dieser Prozess beginnt mit der linearen Förderung der virtuellen Fahrzeuge, mittels Elektrohängelbahnen, durch das Tragwerk. Die Schwenkeinheit schwenkt, ausgehend von einem „Outline“-Bereich, in den „Inline“-Bereich, wobei sich der Roboter auf der Ausgleichseinheit des Schwenkmoduls mit Abschluss dieses Schwenkprozesses unter dem Fahrzeug befindet.

Entlang des Tragwerks, beschleunigt die Schwenkeinheit auf die Geschwindigkeit der Elektrohängelbahn und verfährt parallel zu dieser durch das Tragwerk. Über eine mechanische Synchronisationseinheit wird die Schwenkeinheit an die Elektrohängelbahn gekoppelt. Nach der erfolgreichen Synchronisation, beginnt der Schraubprozess durch den Roboter mit montiertem Schraubwerkzeug, während die Schwenkeinheit und die Elektrohängelbahn weiter durch das Tragwerk verfahren. Mit dem Abschluss des Schraubprozesses, verfährt der Roboter in seine Ausgangsposition, die Synchronisation wird aufgehoben und die Schwenkeinheit verlangsamt, stoppt und verfährt zurück zu ihrer Ausgangsposition, während die Elektrohängelbahn weiter durch die Montagelinie verfährt. Dieser zusammengefasst vorgestellte Prozess ist in Abbildung 8.2-4 in drei Schritten gegliedert dargestellt.

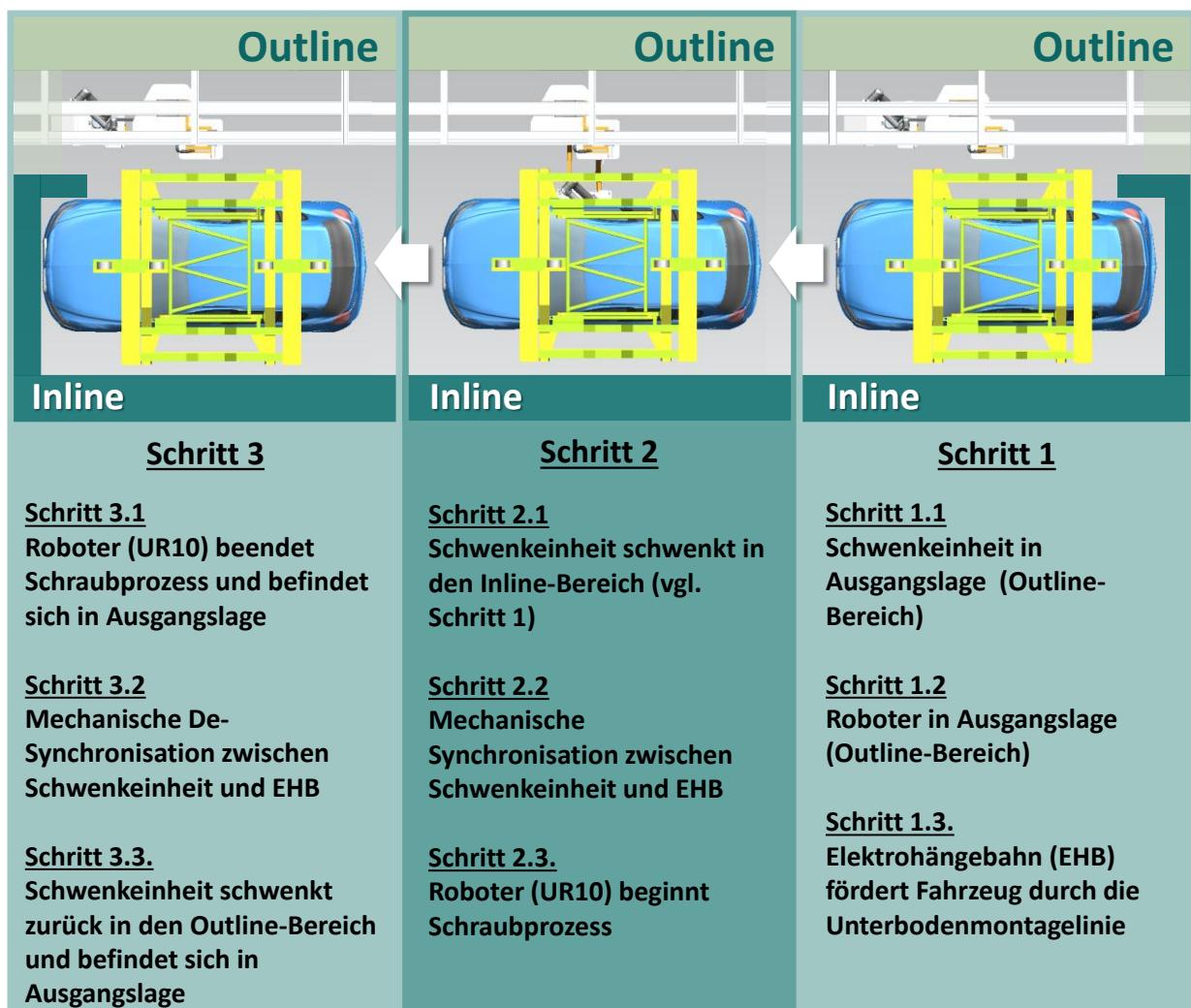


Abbildung 8.2-4. Draufsicht der Unterbodenmontagelinie mit Untergliederung des Unterbodenmontageprozesses in vier Schritte und ohne Tragwerkdarstellung.

8.3 Validierung des Rahmenwerks

8.3.1 Produktionsplanungs- und Reaktionsstrategieszenarien

Der in *Kapitel 8.2* geschilderte Anwendungsfall dient als Validierungsgrundlage zur Integration von cyber-physischen Produktionssystem-Charakteristiken durch die Anwendung des integrierten Vorgehensmodells. Hierzu werden nachfolgend die Planungsszenarien (Use-Cases) kurz skizziert, um die Rahmenbedingungen zu schärfen. Im ersten Schritt (*Kapitel 8.3.2*) wird innerhalb eines ersten Use-Cases angenommen, dass die bereits durch virtuelle Modelle entwickelte und real existierende Anlage Bestandteil einer flexiblen Reaktionsstrategie ist. Durch die Einführung eines neuen Produktes soll, mittels des integrierten Vorgehensmodells, die Praktikabilität und die Erfüllbarkeit der neuen Anforderungen des veränderten Produktionsprogramms bewertet werden. Im zweiten Schritt werden mit den Ergebnissen dieser Bewertung weitere potentielle Anpassungsmöglichkeiten durch rekonfigurationsfähige (*Use-Case 2; Kapitel 8.3.3*) und wandlungsfähige (*Use-Case 3; Kapitel 8.3.4*) Reaktionsstrategien innerhalb der virtuellen Unterbodenmontagelinie diskutiert und durch den Einsatz des integrierten Vorgehensmodells erarbeitet. Die *Tabelle 8.3-1* liefert eine Übersicht über die Struktur dieses Kapitels und den darin betrachteten Reaktionsstrategien.

Tabelle 8.3-1. Gliederung der zu validierenden Reaktionsstrategien.

	Kapitel 8.3.2	Kapitel 8.3.3	Kapitel 8.3.4
	Use-Case A	Use-Case B	Use-Case C
CPPS Charakteristik	Flexibilität	Rekonfigurierbarkeit	Wandlungsfähigkeit
Version Unterbodenverkleidung	UBV0 Schrauben & UBV 1 (Seite) Schrauben	UBV0 Schrauben & UBV2 (Service) Pinning	UBV0 Schrauben, UBV2 (Service) Pinning & UBV2 (Service) Kleben
Anhangsergebnisse	Erreichbarkeits- und Kollsionsanalyse (Anhang: 8.3.2)	Erreichbarkeits- und Kollsionsanalyse (Anhang: 8.3.3)	Erreichbarkeits- und Kollsionsanalyse (Anhang: 8.3.4)

8.3.2 Use-Case A: Einführung neuer Produkte in die flexible Unterbodenmontagelinie

In diesem Kapitel wird die Eignung der virtuellen Unterbodenmontagelinie zur Montage einer weiteren Unterbodenverkleidung, entsprechend *Abbildung 8.3-1*, mit den initial geplanten und entwickelten Ressourcenumfängen validiert. Hierzu wurden die Ausgleichs- und die

Synchronisationseinheit der Schwenkeinheit untergeordnet und zu einer Ressource zusammengefasst. Darüber hinaus werden ausschließlich Ressourcen berücksichtigt, die direkt an der Simulation teilnehmen. Da für die Montage der neuen Unterbodenverkleidung die gleichen Schrauben verwendet werden, können die bestehenden Schraubwerkzeuge beibehalten werden. Für die Operationsgeometrie des eingesetzten Roboters ergeben sich zwar wesentliche Unterschiede gegenüber der initial betrachteten Unterbodenverkleidung, jedoch erfüllt die initial erarbeitete Systemfunktionalität aller eingesetzten Ressourcen die Anforderung der hinzugekommenen Unterbodenverkleidung. In Abbildung 8.3-1 ist die Einführung der neuen Unterbodenverkleidung durch eine virtuelle Inbetriebnahme validiert worden. Dadurch kann die neue Unterbodenverkleidung mit den existierenden Ressourcen montiert werden, wodurch die Definition der Flexibilität in dieser Arbeit erfüllt ist. Im Anhang 8.3.2 sind die Ergebnisse der Erreichbarkeits- und Kollisionsuntersuchungen dargestellt. Die Ergebnisse belegen, dass der verwendete Roboter in der Lage ist, die Montagelokationen zu erreichen und dabei keine Kollisionen mit dem Fahrzeug oder anderen eingesetzten technologischen Ressourcen aufweist.

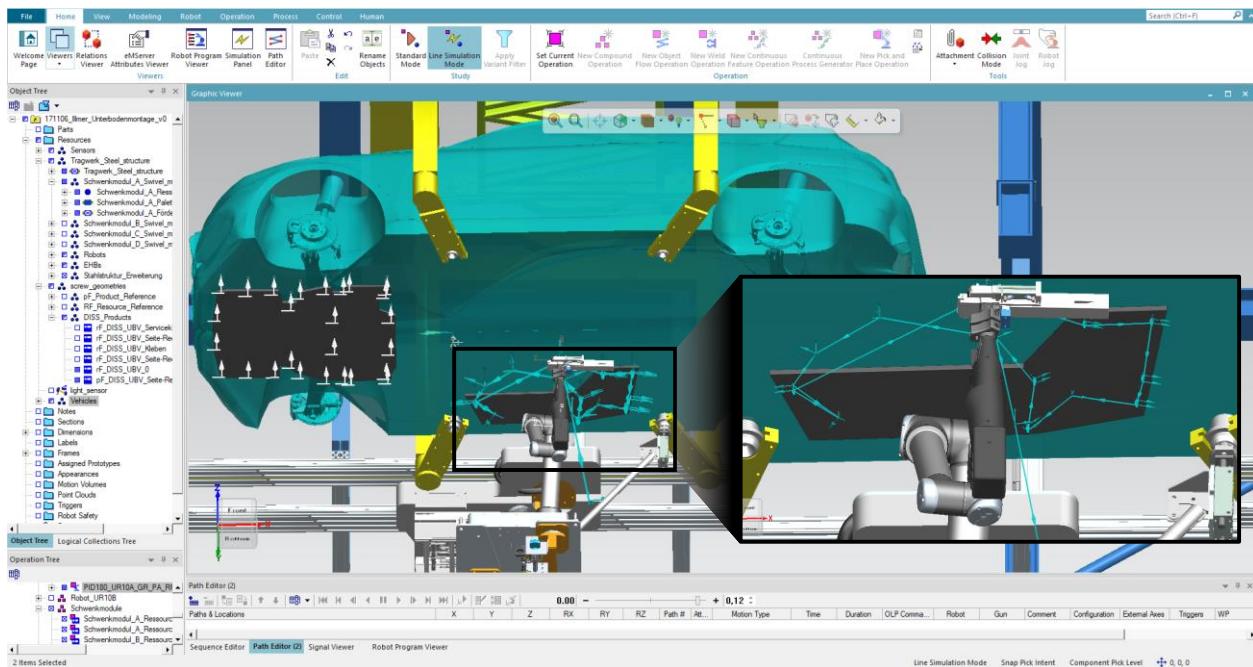


Abbildung 8.3-1. Einführung einer neuen Unterbodenverkleidung durch logische Änderungen auf der Prozess- und Operationsebene in der virtuellen Unterbodenmontagelinie.

In Abbildung 8.3-2 ist die Veränderung der dedizierten Operations-Ressourcen-Produktstrukturzuordnung, infolge der Einführung der neuen Unterbodenverkleidung (Verkleidung B), dargestellt.

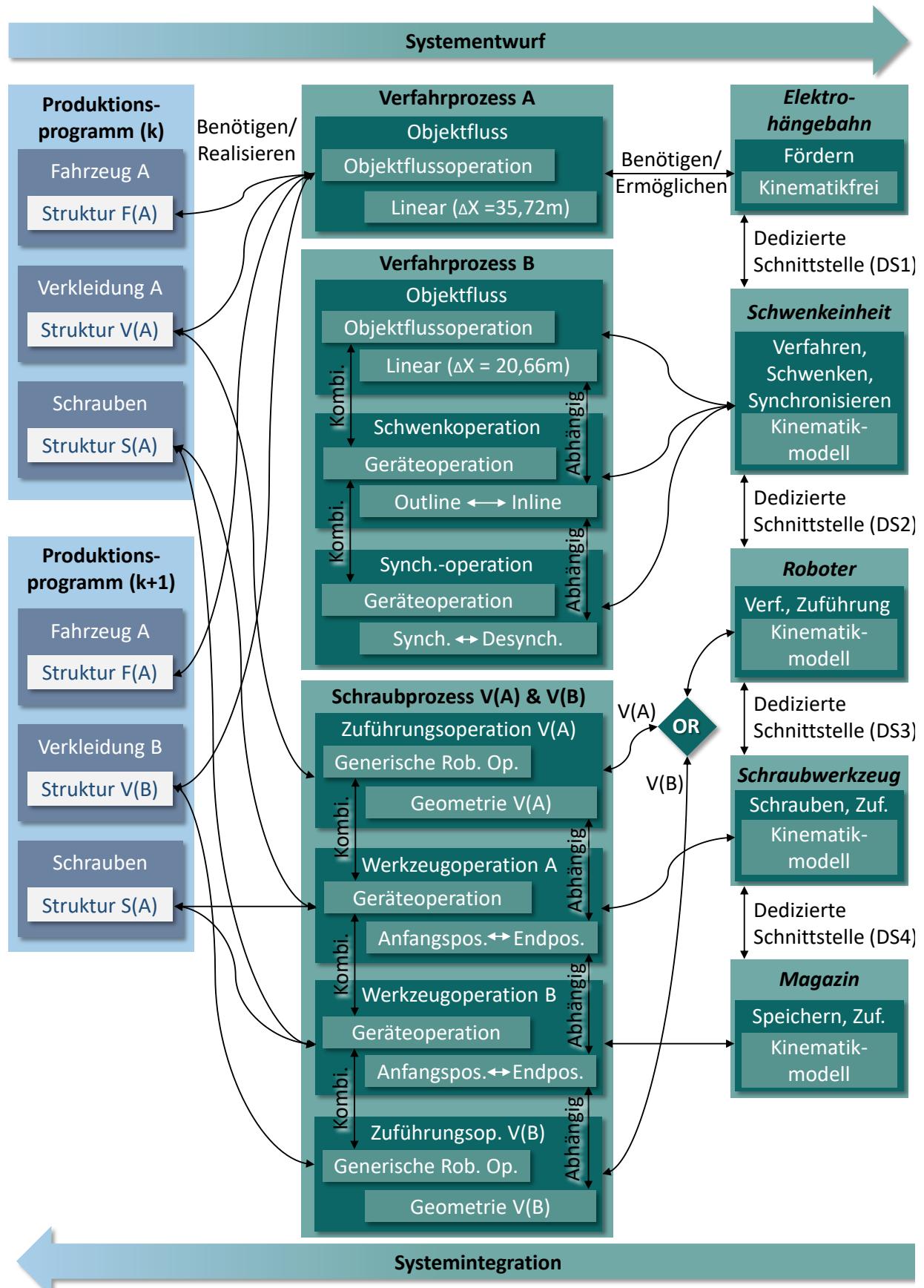


Abbildung 8.3-2. Flexibilität als Reaktionsstrategie infolge der Einführung eines neuen Produktes in die existierende Unterbodenmontagelinie.

8.3.3 Use-Case B: Rekonfigurierbarkeit in der virtuellen Unterbodenmontage

Unterbodenmontageverkleidungen moderner Fahrzeuge werden zunehmend mehrteilig gestaltet. Dabei sind von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen betroffene Bereiche durch einen Servicezugang erreichbar, ohne die Notwendigkeit einer Demontage der gesamten Unterbodenverkleidung. In diesem Kontext soll innerhalb der Unterbodenmontagelinie eine zweiteilige Unterbodenverkleidung an das Fahrzeug montiert werden. Dabei wird der Bereich des Servicezuganges mit dem Fahrzeug verschraubt und der nicht von Wartungs- und Instandhaltungsarbeiten betroffene Bereich gepinnt. Ein Pin ist dabei eine, auf Kunststoff basierende, Schnellbefestigungsmöglichkeit, die durch Kraftbeaufschlagung gefügt werden kann. Da die Fahrzeuge mit einer ein- oder mehrteiligen Unterbodenverkleidung innerhalb der Unterbodenmontage gleichermaßen berücksichtigt werden sollen, wird der Einsatz eines rekonfigurierbaren Montagesystems diskutiert. Die Integration des rekonfigurierbaren Montagesystems soll mit den Möglichkeiten des integrierten Vorgehensmodells erarbeitet werden. Im Wesentlichen ergeben sich durch die zwei Varianten der Unterbodenverkleidungen zwei Montagesystemkonfigurationen. In der ersten Konfiguration wird die einteilige Unterbodenverkleidung vollständig an das Fahrzeug verschraubt oder gepinnt. Es können auch Mischformen existieren. Eine reine Schraubkonfiguration ist in Abbildung 8.3-3 und im Anhang 8.3.3 als Zwillingsmontage dargestellt. Dabei wird die Unterbodenmontagelinie durch eine zusätzliche Schwenkeinheit und einen Roboter mit rekonfigurierbaren Werkzeugen ergänzt.

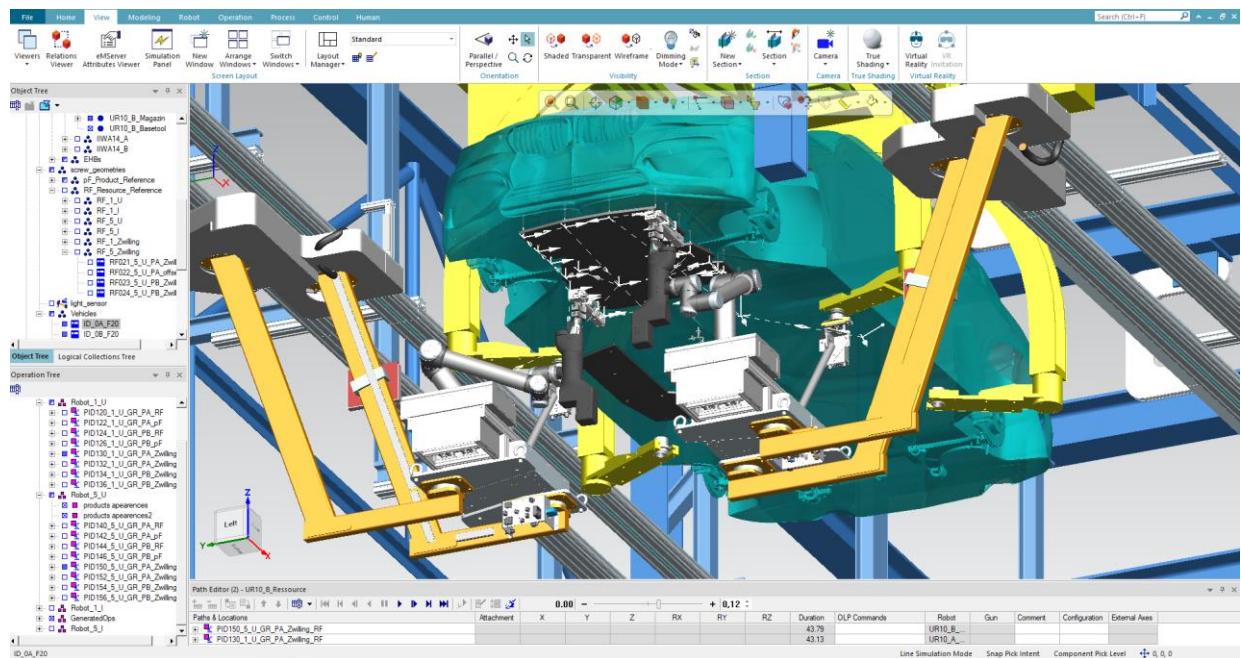


Abbildung 8.3-3. Zwillingsmontage der Verkleidung V(A) in Schraubkonfiguration.

Während die Montage der Unterbodenverkleidung in *Abbildung 8.3-3* ausschließlich durch einen Schraubprozess, im Rahmen der ersten Systemkonfiguration, dargestellt wird, ist in *Abbildung 8.3-4* und im *Anhang 8.3.3* eine kombinierte Montage durch einen Schraub- und einen Pinningprozess dargestellt. Der Bereich des Servicezuganges wird weiterhin durch das flexible Montagesystem verschraubt. Der Bereich, der außerhalb eines Servicebedarfs liegt, wird in dieser Systemkonfiguration gepinnt. Dazu wurde das Schraubwerkzeug am zweiten Roboter durch ein Pinning-Werkzeug ersetzt. Möglich werden diese kurzfristige Umrüstung des Werkzeuges und die Änderung der Systemfunktionalität, durch die Berücksichtigung aller Produktvarianten während der Produktionsplanungsphase. Die dedizierte Schnittstelle zwischen den Werkzeugen und dem eingesetzten Roboter besteht aus einem Werkzeugwechselsystem, dass für diesen Umrüstungszweck zu erarbeiten ist und den mechanischen Aspekt der Schnittstelle adressiert. Sowohl das Schraubwerkzeug als auch das Pinning-Werkzeug werden über den Medienflansch mit elektrischer sowie pneumatischer Energie versorgt.

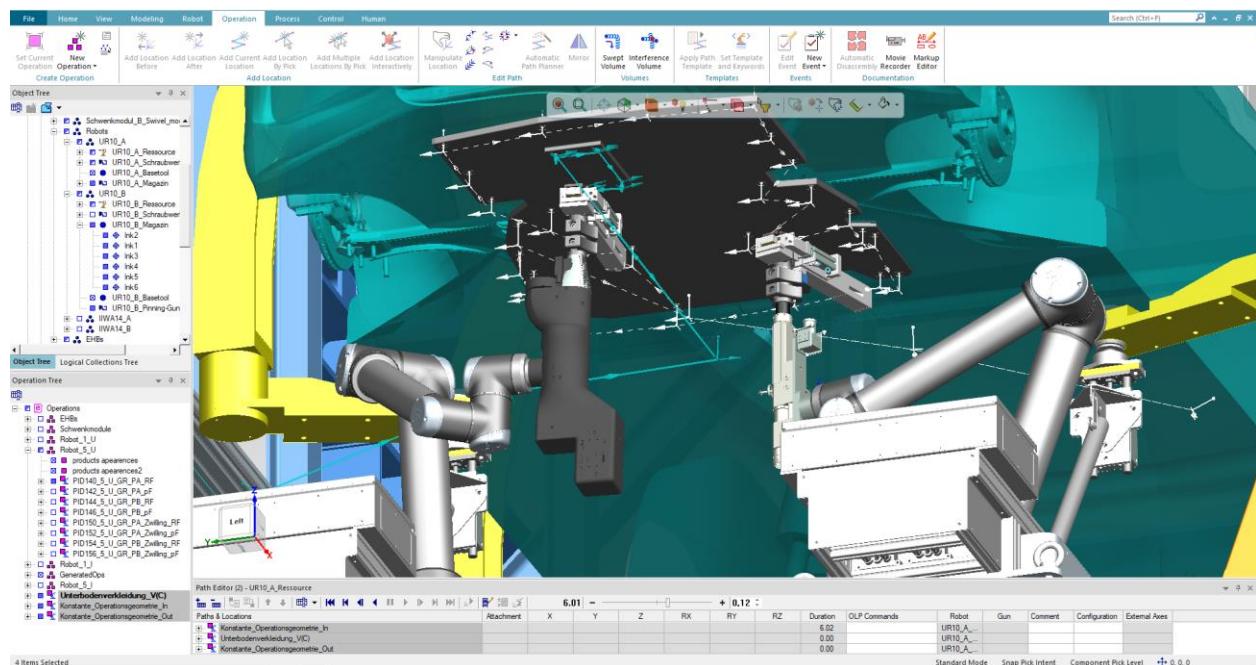


Abbildung 8.3-4. Zwillingsmontage der Unterbodenverkleidung V(C) in Pinning-Konfiguration.

Die Einführung einer mehrteiligen Unterbodenverkleidung (Verkleidung C) ist in *Abbildung 8.3-5*, als Folge der Einführung eines neuen Produktes in die virtuelle Unterbodenmontagelinie, dargestellt. Aufgrund der Umfänge der eingesetzten Ressourcen, beschränkt sich die *Abbildung 8.3-5*, der konfigurationsbasierten Operations- und Ressourcenzuordnung, auf die Darstellung der rekonfigurierten virtuellen Ressourcen. Der Bedarf einer veränderten Systemfunktionalität,

hervorgerufen durch den Einsatz von Pins anstelle von Schrauben, verursacht eine Notwendigkeit neuer Prozesstypen und eine veränderte Ressourcennutzung. Die Schnittstelle zwischen den beiden betrachteten Systemkonfigurationen bildet der eingesetzte Montageroboter.

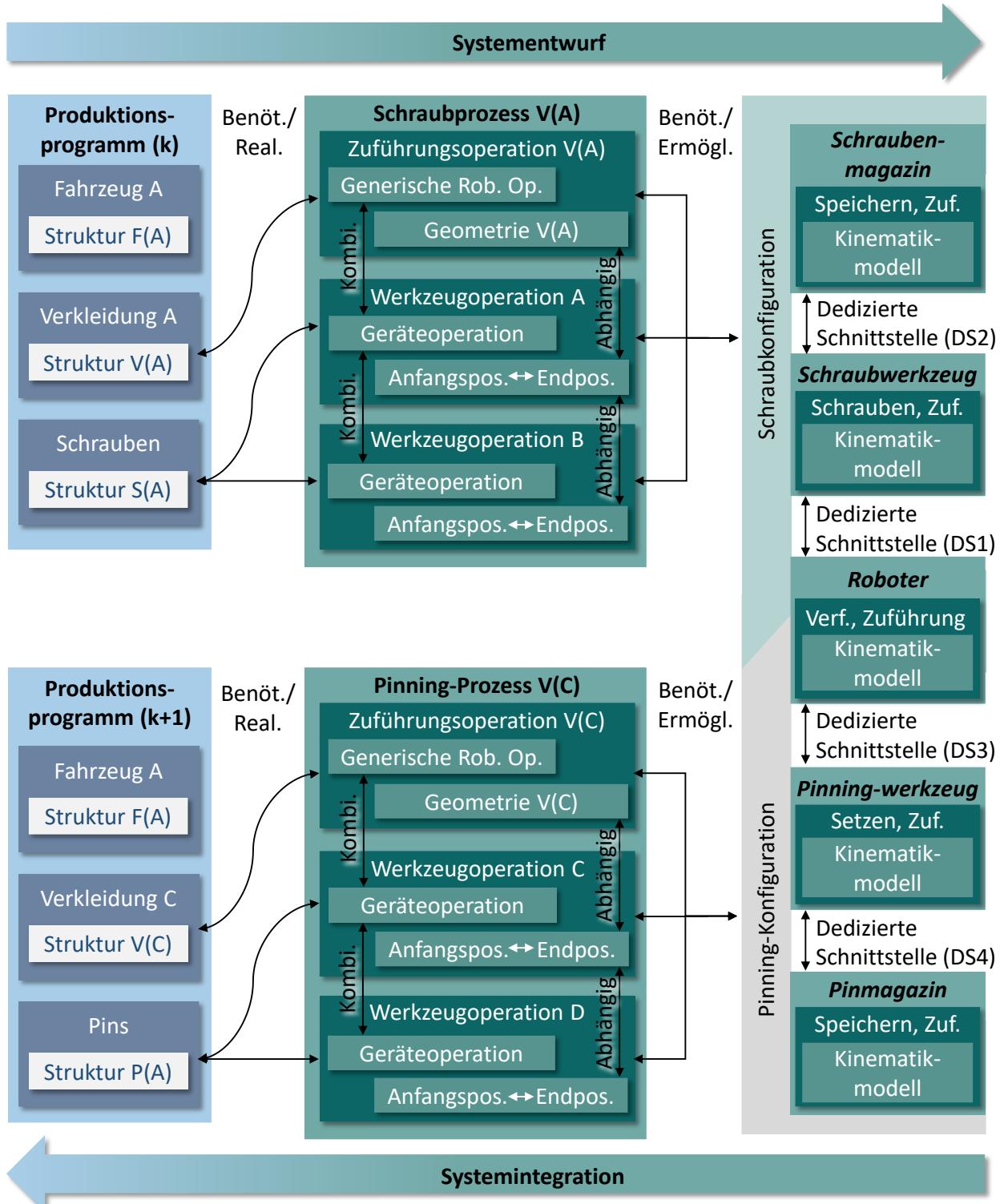


Abbildung 8.3-5. Rekonfiguration als Reaktionsstrategie infolge der Einführung einer mehrteiligen Unterbodenverkleidung in die virtuelle Unterbodenmontagelinie.

8.3.4 Use-Case C: Wandlungsfähigkeit in der virtuellen Unterbodenmontage

Durch die strategische Planung einer wandlungsfähigen Unterbodenmontage können auch zum Zeitpunkt der Produktionsplanungsphase nicht berücksichtigte Produkte und sich verändernde Produktanforderungen durch eine modulare Systemstruktur realisiert werden. Daher werden nachfolgend zwei Szenarien der Wandlungsfähigkeit skizziert. Im ersten Szenario wird von einem erhöhten Bedarf an Schraubprozessen in der virtuellen Unterbodenmontagelinie ausgegangen. Hierzu werden zwei neue Schwenkeinheiten in die virtuelle Unterbodenmontagelinie eingebracht und als Schwenkmodule definiert. Die Schwenkmodule unterscheiden sich von den Schwenkeinheiten durch ihre universellen Schnittstellen an ihren Systemgrenzen. Auf der anderen Seite dieser Systemgrenzen können sie technische Apparaturen, die ebenfalls universelle Schnittstellen aufweisen, aufnehmen und durch die Unterbodenmontagelinie verfahren. In dem ersten Szenario werden die zusätzlichen Schwenkmodule mit den gleichen Robotern, Schraubwerkzeugen und Schraubmagazinen ausgestattet, wie sie in *Kapitel 8.3.2* eingesetzt wurden und erlauben dadurch einen Skalierungseffekt des Schraubprozesses als Reaktion auf einen steigenden Bedarf der Ausbringungsmenge. Die Umsetzung in der virtuellen Unterbodenmontagelinie ist in *Abbildung 8.3-6* und im *Anhang 8.3.4* dargestellt. Das Ergebnis der Modularisierung der eingesetzten Produktionsressourcen ist in *Abbildung 8.3-8* dargestellt.

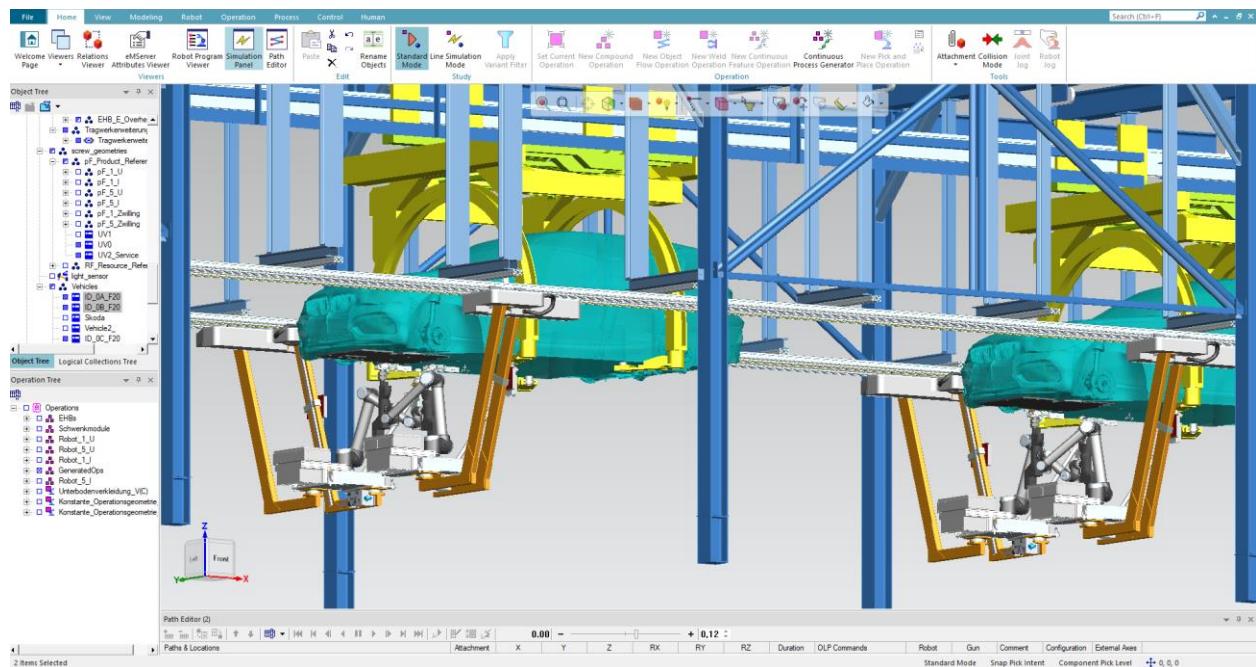


Abbildung 8.3-6. Wandlungsfähigkeit als Reaktionsstrategie infolge eines Skalierungsbedarfs der Schraubprozesse in der virtuellen Unterbodenmontagelinie.

Im zweiten Szenario sollen die Unterbodenverkleidungen nicht geschraubt oder gepinnt, sondern mit dem Fahrzeugunterboden verklebt werden. Zusätzlich sollen zukünftig Ansätze zur Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) in der Unterbodenmontagelinie in den Vordergrund rücken. In der Umsetzung dient die modulare Systemstruktur mit ihren universellen Schnittstellen als Grundlage, um den skizzierten Anforderungen zu begegnen. Im ersten Schritt werden die eingesetzten „UR10“ Roboter auf den zusätzlich eingesetzten Schwenkmodulen durch zwei „IIWA14“ Roboter ersetzt, um den technischen Anforderungen an eine MRK zu entsprechen (*KUKA Deutschland GmbH Sales, o. D.*). Im zweiten Schritt werden die MRK-Roboter mit einem Klebewerkzeug zum Auftragen eines Prozesswerkstoffes auf die Unterbodenverkleidung und einem Greifwerkzeug zum Handhaben der Unterbodenverkleidungen ausgestattet. Dabei liefern die universellen Schnittstellen auch die Möglichkeit, die Werkzeuge der eingesetzten Roboter durch die Schraub- und Pinning-Werkzeuge zu ersetzen. Damit kann einer Vielzahl produktseitig bekannter und auch unbekannter Anforderungen durch einen modularen Systemaufbau begegnet werden. Das geschilderte zweite Szenario ist in Abbildung 8.3-7 dargestellt. Eine Gesamtbetrachtung der Wandlungsfähigkeit dieses Bereiches der virtuellen Unterbodenmontagelinie liefert Abbildung 8.3-8. Die ressourceneitigen Umfänge in Abbildung 8.3-8 sind auf die Darstellung der Inhalte der zusätzlich eingeführten Schwenkmodule begrenzt.

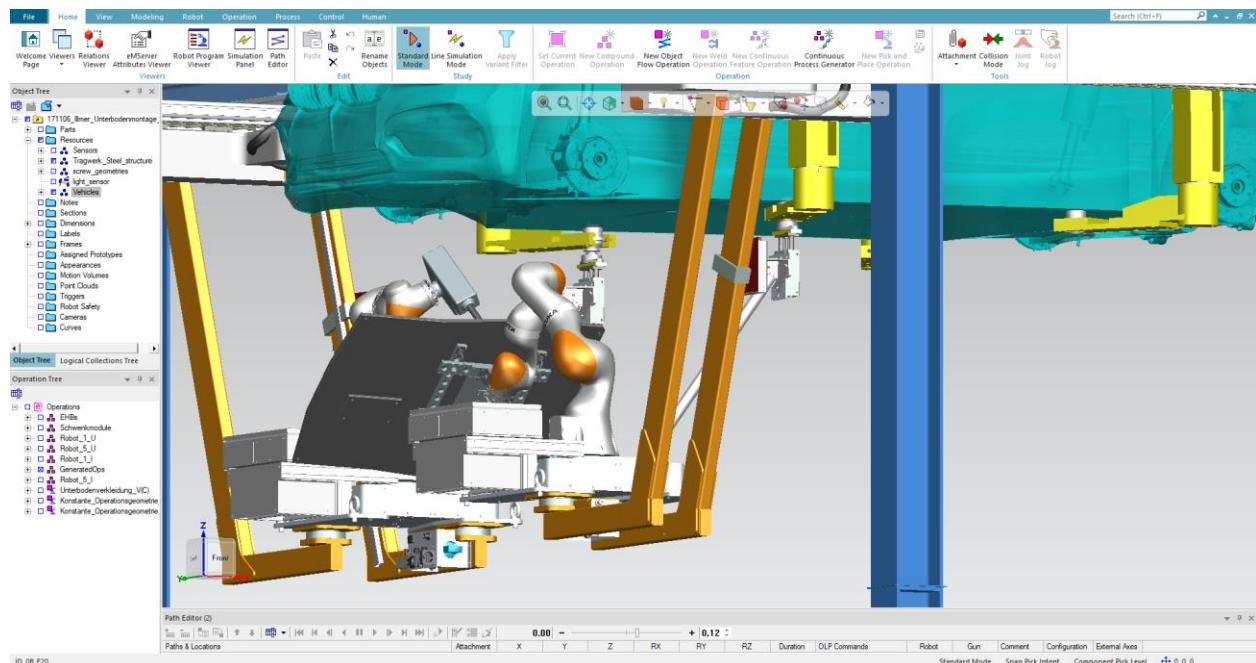


Abbildung 8.3-7. Wandlungsfähigkeit als Reaktionsstrategie auf den Bedarf an neuen Prozessen durch initial ungeplante Produkte in die modulare Systemstruktur der virtuellen Unterbodenmontagelinie.

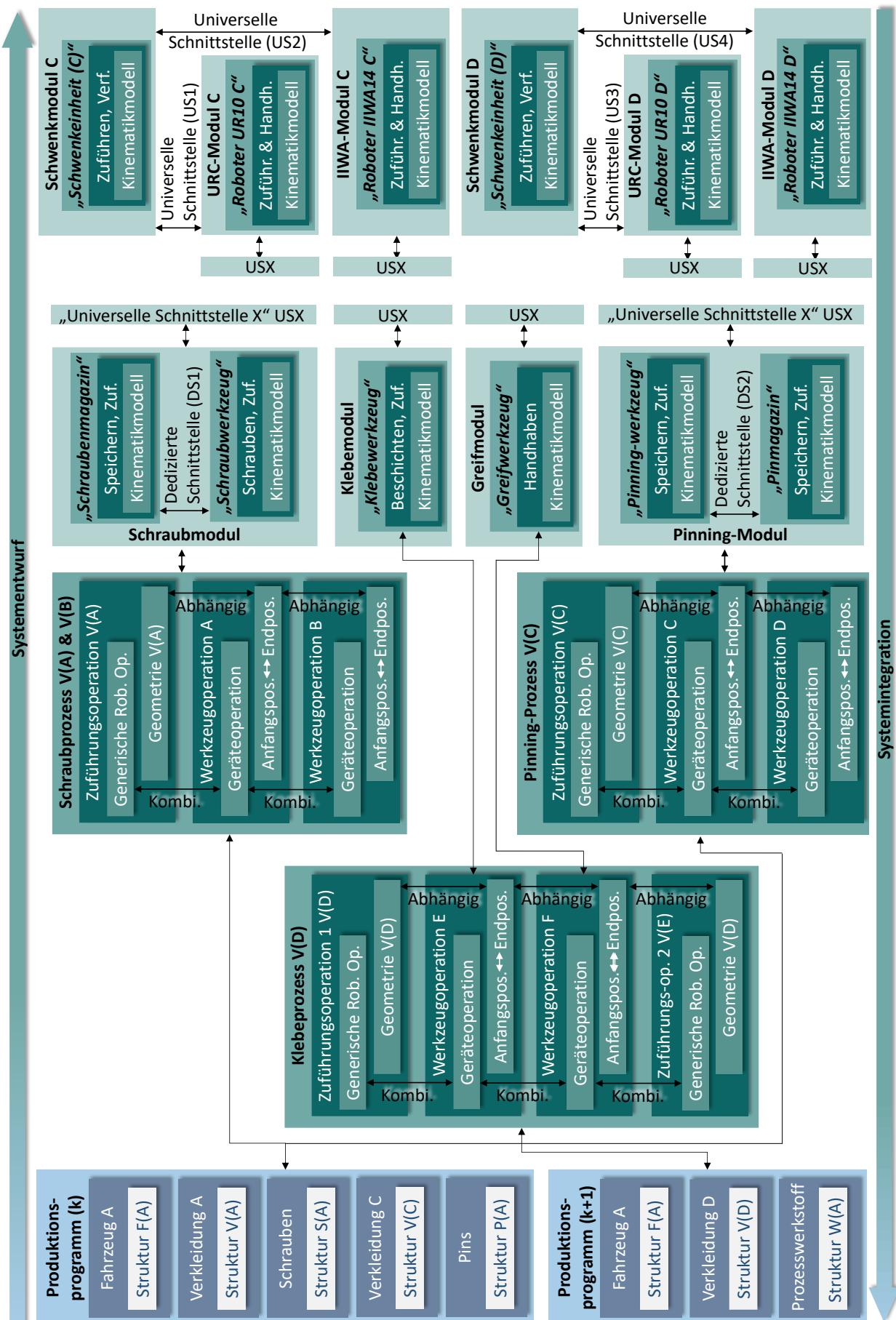


Abbildung 8.3-8. Wandlungsfähigkeit als Reaktionsstrategie infolge von Produktänderungen.

8.4 Evaluierung der Validierungsergebnisse

In diesem Kapitel wird das integrierte Vorgehensmodell anhand eines, in die virtuelle Entwicklungsumgebung überführten, industrienahen Demonstrators validiert. Dabei steht die Berücksichtigung der Flexibilität, der Rekonfigurierbarkeit und der Wandlungsfähigkeit als Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme innerhalb der physikfreien virtuellen Inbetriebnahme im Vordergrund.

Der Einsatz des integrierten Vorgehensmodells zur Erarbeitung und Bewertung der Möglichkeiten auf eine neu eingeführte Unterbodenverkleidung innerhalb der flexiblen Unterbodenmontage stellt sowohl eine definitionsgerechte Reaktion, als auch die Erfüllung der produktseitigen Anforderungen dar. Darüber hinaus können durch das integrierte Vorgehensmodell auch Prozesse entstehen, die zunächst keinem eindeutigen Produkt während der Systementwurfsphase zugeordnet werden können. Jedoch hat sich gezeigt, dass die zunächst nicht ableitbaren Prozesse Bestandteile der Ergebnisse der Systemintegrationsphase sein können. Damit werden die Möglichkeiten, aber gleichzeitig auch die, aus der Definition ableitbaren, Grenzen der Reaktionsmöglichkeiten innerhalb einer flexiblen Unterbodenmontagelinie diskutiert. Die Bewertung der zeitlichen und finanziellen Aufwände der logischen Veränderungsmaßnahmen ist nicht Bestandteil der Betrachtungen.

Anschließend werden, durch die Einführung einer Unterbodenverkleidung mit veränderten Prozessanforderungen, die Möglichkeiten einer rekonfigurierbaren Unterbodenmontage validiert. Entsprechend der in dieser Arbeit gewählten Definition der Rekonfigurierbarkeit kann ein vollständig neuer Prozess durch ein planbares gezieltes Umrüsten einzelner Ressourcenbestandteile ermöglicht werden. Die Umrüstzeiten oder eine konkrete Realisierung der dedizierten Schnittstellen werden in diesem Zusammenhang nicht diskutiert.

Im letzten Teil des Kapitels werden die Reaktionsmöglichkeiten innerhalb einer wandlungsfähigen Unterbodenmontage anhand eines Skalierungs- und eines MRK-Szenarios diskutiert. Durch die ressourcenseitige Modularisierung und die Definition von universellen Modulschnittstellen, bestehen umfangreiche Veränderungsmöglichkeiten an den eingesetzten Ressourcen. Auf eine konkrete Realisierung der universellen Modulschnittstellen wird in diesem Kapitel verzichtet. In der wissenschaftlichen Literatur, beispielsweise in (*Grimske, 2014, S. 77-86, 131-141*), existieren jedoch bereits disziplinorientierte Ansätze universeller Schnittstellen. Durch

die teilweise notwendige Bereitstellung, Zuführung und Speicherung von Prozesswerkstoffen sind die Möglichkeiten der Roboter-Werkzeug-Kombinationen entweder nur eingeschränkt beliebig oder mit umfangreicheren Umrüstungsmaßnahmen verbunden, die jedoch nicht Bestandteil der Validierungsumfänge in diesem Kapitel sind.

Die Wahl der Simulationswerkzeuge zur Validierung fiel auf eine Software-in-The-Loop Konfiguration, bestehend aus „*Siemens Process-Simulate*“ zur Geometriesimulation und dem „*Siemens TIA-Portal*“ zur stark vereinfachten projektorientierten Abbildung der Automation. Die Validierung wurde mit diesen Software-Werkzeugen erfolgreich durchgeführt. Gesonderte Validierungsnachweise, in denen andere Werkzeuge, im Sinne einer heterogenen Softwarelandschaft, zum Einsatz kommen, ist nicht Teil der übergeordneten Zielstellung dieser Arbeit.

In diesem Kapitel wird somit die Integration von drei Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme in die Unterbodenmontagelinie diskutiert. Durch das integrierte Vorgehensmodell werden die Auswirkungen und Reaktionsstrategien innerhalb einer Montagelinie beispielhaft validiert. Die Ergebnisse dieser Validierung bieten zudem weiteren wissenschaftlichen Raum für eine Erarbeitung von wirtschaftlichen Umrüstungsprozessen sowie rekonfigurierbare und wandlungsfähige Schnittstellenkonzepte.

8.5 Zusammenfassung der Validierung

Dieses Kapitel verfolgte die Zielstellung, das in *Kapitel sieben* erarbeitete integrierte Vorgehensmodell, anhand eines industrienahen Anwendungsfalls, zu validieren.

Der Anwendungsfall umfasst die automatisierte Unterbodenmontage von Verkleidungen an Fahrzeugunterböden und nutzt die Ergebnisse aus (*Scholer, 2018*) als wesentliche Grundlage der Validierung. In verschiedensten Szenarien wurden Ausgangssituationen skizziert und Reaktionsstrategien innerhalb der virtuellen Unterbodenmontagelinie erläutert. Ausgehend von der Einführung neuer Unterbodenverkleidungen wurden die Maßnahmen der verschiedenen Reaktionsstrategien erarbeitet.

In einem ersten Szenario wurde die real existierende Unterbodenmontagelinie in eine virtuelle Entwicklungsumgebung überführt und die Flexibilität der Gesamtsysteme durch die Einführung einer neuen Unterbodenverkleidung validiert. Die virtuelle Unterbodenmontagelinie wurde anschließend um eine weitere Schwenkeinheit erweitert, wobei die Roboter-Werkzeug-Kombination in zwei Montageszenarien rekonfiguriert wird. Im letzten Anwendungsszenario wurde die Unterbodenmontagelinie um zwei Schwenkeinheiten ergänzt, die in ihrer Roboterverwendung und Roboter-Werkzeug-Kombination sowie durch Modularität und universelle Schnittstellen, umfassende physische Veränderungen, infolge der Einführung von geplanten und ungeplanten Produkten und Produktumfängen, erlauben.

Das integrierte Vorgehensmodell ermöglicht die Berücksichtigung von drei identifizierten Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme innerhalb der Modellbildung der virtuellen Inbetriebnahme und integriert diese beispielhaft in die virtuelle Unterbodenmontagelinie.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Kapitel neun beinhaltet eine gesamtheitliche Zusammenfassung dieser Arbeit und ordnet die Ergebnisse aller Kapitel, gebündelt gegenüber den definierten Forschungsfragen aus *Kapitel vier*, ein. Der Zusammenfassung schließt sich ein Ausblick an, innerhalb dessen Möglichkeiten für weitere, auf dieser Arbeit aufbauende, Tätigkeiten diskutiert werden.

9.1 Zusammenfassung

Die Potentiale von cyber-physischen Produktionssystemen werden in der wissenschaftlichen Literatur vielseitig diskutiert, siehe *Kapitel 3.3* und *Kapitel 3.4*. Die Produktionsentwicklung steht mit der industriellen Einführung dieser modernen Systeme vor unterschiedlichsten Herausforderungen, die ihren Ursprung sowohl in der Beherrschung der Komplexität von cyber-physischen Produktionssystemen als auch in fehlenden Erfahrungswerten aufgrund der Systemneuheit finden. Diese Arbeit untersucht daher, wie sich Entwicklungsabteilungen der Einführung cyber-physischer Produktionssysteme, durch den Einsatz von bereits etablierten, simulationsbasierten Entwicklungswerkzeugen, schrittweise nähern können. Das wesentliche Entwicklungswerkzeug in dieser Arbeit ist der Prozess der virtuellen Inbetriebnahme, die in den Entwicklungsabteilungen industrieller Produktionsunternehmen ein fester Bestandteil der Prozesskette ist und bisher zur virtuellen Validierung konventioneller, also nicht cyber-physischer Produktionssysteme, eingesetzt wird. Existierende Arbeiten und Ansätze erfüllen diese Aspekte nur punktuell, siehe *Kapitel vier*. Diese Arbeit setzt sich daher zum Ziel, Möglichkeiten zur Berücksichtigung von cyber-physischen Produktionssystemen innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme zu identifizieren. Vor dem Hintergrund dieses Ziels wird die **übergeordnete Forschungsfrage** formuliert, inwiefern sich die virtuelle Inbetriebnahme durch den Einsatz cyber-physischer Produktionssysteme verändert.

9.1.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Zur Beantwortung dieser Fragestellung ist zunächst in Form einer **zweiten Forschungsfrage** zu klären, was unter cyber-physischen Produktionssystemen in dieser Arbeit verstanden wird. Zur Erarbeitung dieses Verständnisses wird ein Konkretisierungsansatz aus der wissenschaftlichen

Literatur aufgegriffen, der cyber-physische Produktionssysteme anhand von Produktionssystem-Charakteristiken beschreibt. Auf Basis einer umfassenden Literaturrecherche werden aus über 300 wissenschaftlichen Dokumenten und Arbeiten 17 Charakteristiken identifiziert und definiert. Die Definitionen der Charakteristiken in *Kapitel 5.2* bieten vor allem, durch die gesamtheitliche Betrachtung aller identifizierten Charakteristiken, eine deutlichere Abgrenzung zwischen den Charakteristiken und umfassen häufig verwendete Synonyme sowie eine Empfehlung in die englische Sprache. Cyber-physische Produktionssysteme werden in dieser Arbeit, auf Basis der Charakteristik-Definitionen, durch Charakteristik-Kombinationen beschrieben.

Um den Einfluss von cyber-physischen Produktionssystemen auf die virtuelle Inbetriebnahme zu konkretisieren, wird im Rahmen der **dritten Forschungsfrage** identifiziert, welche der Charakteristiken Einfluss auf die virtuelle Inbetriebnahme nehmen können. Hierzu wird ein Klassifizierungssystem erarbeitet, in welches die Charakteristiken in eine, aus sechs Ebenen bestehende, Hierarchie eingeordnet werden. Die Bezeichnungen der Ebenen entsprechen der Ebenen eines produzierenden Unternehmens. Die Klassifizierung der Charakteristiken erfolgt anhand von zwei Klassifizierungsaspekten. Während die Charakteristiken nach dem ersten Klassifizierungsaspekt und entsprechend ihrer Definition eingeordnet werden, stehen im zweiten Klassifizierungsaspekt potentielle Abhängigkeiten zwischen den Charakteristiken im Vordergrund. Im Ergebnis der Klassifizierung in *Kapitel 5.3* und *5.4* werden die hierarchisierten Charakteristiken dem Anwendungsfeld der virtuellen Inbetriebnahme gegenübergestellt und 14 Charakteristiken mit einem potentiellen Einfluss auf die virtuelle Inbetriebnahme identifiziert.

Nachdem die Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme mit einem potentiellen Einfluss auf die virtuelle Inbetriebnahme identifiziert sind, werden, im Rahmen der **vierten Forschungsfrage**, die Möglichkeiten zur Berücksichtigung dieser Charakteristiken in der virtuellen Inbetriebnahme diskutiert. Als Grundlage dient ein allgemeines Vorgehensmodell, das der Grundarchitektur eines V-Modells entspricht, in eine Produkt- und eine Produktionsebene gegliedert ist und den gesamten Prozess der virtuellen Inbetriebnahme zur Verifikation und Validierung definierter Anforderungen verwendet. Aus dem allgemeinen Vorgehensmodell werden in dieser Arbeit drei charakteristische Vorgehensmodelle zur Berücksichtigung der Flexibilität, der Rekonfigurierbarkeit und der Wandlungsfähigkeit innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme beispielhaft abgeleitet. Für die Flexibilität entsteht dabei eine dedizierte, für die Rekonfigurierbarkeit eine konfigurationsbasierte und für die Wandlungsfähigkeit eine

modulbasierte Zuordnung zwischen den virtuellen Prozessen, Operationen, Funktionen und eingesetzten Ressourcen. Diese, den jeweiligen Charakteristik-Definitionen entsprechenden, Zuordnungsprinzipien sind die Gestaltungsgrundsätze der Modellentstehung der virtuellen Inbetriebnahme innerhalb der charakteristischen Vorgehensmodelle, die beispielhaft in den *Kapiteln 6.6, 6.7 und 6.8* umgesetzt sind.

Mit den Ergebnissen der drei charakteristischen Vorgehensmodelle formuliert die **fünfte Forschungsfrage** den Bedarf eines Rahmenwerks zur Organisation der drei charakteristischen Vorgehensmodelle. Das Rahmenwerk liefert die Möglichkeit einer kombinierten Charakteristik-Betrachtung, entsprechend dem Verständnis von cyber-physischen Produktionssystemen in dieser Arbeit. Das Rahmenwerk bildet ein integriertes Vorgehensmodell, das ebenfalls der Grundarchitektur eines V-Modells entspricht und die charakteristischen Vorgehensmodelle zu einem Vorgehensmodell bündelt. Dabei werden die identischen Vorgehensschritte aller charakteristischen Vorgehensmodelle zusammengefasst und die wesentlichen Unterschiede im Bereich der Turbulenzhandhabung gleichermaßen berücksichtigt, siehe *Kapitel sieben*. Das integrierte Vorgehensmodell bildet somit ein Rahmenwerk, innerhalb dessen die charakteristischen Vorgehensmodelle kombiniert betrachtet werden können. Im Ergebnis bedeutet das auch die Möglichkeit der Berücksichtigung von cyber-physischen Produktionssystem-Charakteristiken innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme, entsprechend der übergeordneten ersten Forschungsfrage.

Das integrierte Vorgehensmodell wird, im *achten Kapitel*, anhand einer virtuellen Unterbodenmontagelinie verifiziert und validiert. Dabei werden die Zuordnungsprinzipien während der Modellentstehung in mehreren Szenarien beispielhaft dargelegt und die Anwendung des Rahmenwerks, ausgehend von der Einführung neuer Produkte in die bestehende virtuelle Unterbodenmontagelinie, diskutiert. Als Folge der Einführung neuer Produkte wird ein besonderer Fokus auf die Reaktionsstrategien der cyber-physischen Produktionssystem-Charakteristiken gerichtet. In unterschiedlicher Tiefe können somit Veränderungen an den eingesetzten Ressourcen vorgenommen und auf die verschiedenen Anforderungen der neuen Produkte reagiert werden. Die Evaluierung der Validierungsergebnisse bestätigt die grundsätzliche Eignung des Rahmenwerks als ergänzendes Entwicklungswerkzeug für Anwender der virtuellen Inbetriebnahme, die zukünftig neben konventionellen Produktionssystemen auch cyber-physische Produktionssystem-Charakteristiken berücksichtigen möchten.

Der Einfluss von cyber-physischen Produktionssystemen auf den Prozess der virtuellen Inbetriebnahme kennzeichnete den wesentlichen Inhalt der **übergeordneten Forschungsfrage** in dieser Arbeit. Cyber-physische Produktionssysteme werden in dieser Arbeit durch die Verwendung von kombinierten Produktionssystemcharakteristiken beschrieben. Diese Charakteristiken weisen jeweils von einander, zu differenzierende konzeptionelle Zuordnungen zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen während des Produktionsentstehungsprozesses und damit auch während der virtuellen Inbetriebnahme auf. Während der virtuellen Inbetriebnahme werden Prozesse kontinuierlich in Operationen und Funktionen untergliedert und je nach gewählter Reaktionsstrategie den Ressourcen zugeordnet. Dadurch gestaltet sich die virtuelle Inbetriebnahme, unter dem Einfluss von cyber-physischer Produktionssystemen, nicht mehr länger als ein, auf ein einzelnes Produkt orientierter Modellbildungs- und Validierungsprozess mit voneinander isolierten produktorientierten Simulationsstudien. Vielmehr ist die durch cyber-physische Produktionssysteme geprägte virtuelle Inbetriebnahme ein Prozess der zunehmend konkreter und gleichermaßen auf ein aktuelles und ein zukünftiges Produktionsprogramm ausgerichtet ist.

9.1.2 Grenzen des Ansatzes

Das integrierte Vorgehensmodell bildet als Rahmenwerk das übergeordnete Werkzeug zur Berücksichtigung von cyber-physischen Produktionssystemcharakteristiken innerhalb der virtuellen Inbetriebnahme. Obwohl in *Kapitel fünf* 17 Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme identifiziert worden sind, werden innerhalb des Rahmenwerks ausschließlich drei Charakteristiken diskutiert. Die Möglichkeit einer Ableitung von Vorgehensmodellen auch für die anderen 14 Charakteristiken garantiert der Ansatz in dieser Arbeit nicht. Die Charakteristiken haben einen konkreten Einfluss auf die Wahl des Schnittstellenkonzeptes zwischen einzelnen Ressourcenbestandteilen. Der Ansatz in dieser Arbeit diskutiert diese in ihrer konzeptionellen Gestalt. Eine konkrete Ausarbeitung eines Schnittstellenkonzepts liefert das Rahmenwerk jedoch nicht. Die Validierung des Rahmenwerks führte zu erfolgreichen Ergebnissen. Jedoch wurde für die Validierung ausschließlich die Softwarekombination, bestehend aus „*Process-Simulate*“ und dem „*Totally Integrated Automation Portal*“, der Siemens Aktiengesellschaft verwendet. Der Ansatz kann dadurch keine Anwendungseignung für andere Softwares garantieren.

9.1.3 Evaluierung der Ergebnisse der Forschungsfragen

Im Verlauf des neunten Kapitels wurden die Ergebnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Als Teil dieser Zusammenfassung wurden die Forschungsfragen auf Basis der Ergebnisse in dieser Arbeit beantwortet und die Grenzen des Ansatzes dieser Arbeit diskutiert. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Forschungsfragen kritisch bewertet. Die Bewertung beruht auf einem Ampelsystem, wobei die Farbe „rot“ eine Frage unbeantwortet lässt, die Farbe „gelb“ eine grundsätzlich beantwortete Frage mit geringfügigen Einschränkungen kennzeichnet und die Farbe „grün“ eine vollständig beantwortete Frage beschreibt.

Tabelle 9.1-1. Ampelsystem-orientierte Evaluierung über die Erfüllung der Beantwortung der Forschungsfragen.

Forschungsfrage	Evaluierung	Bemerkung	Offen bleibt,...
FF1		Die Charakterisierung von CPPS führte zur erfolgreichen Feststellung ihrer Beeinflussung des VIBN-Prozesses.	...ob sich diese Beeinflussung bei Verwendung eines anderen Konkretisierungsansatzes verändert.
FF2		Die Identifizierung von 17 Charakteristiken führte zu einer umfassenden CPPS Beschreibung.	...welcher Stellenwert sogenannten "Selbst"-Charakteristiken zuzuordnen ist.
FF3		Durch die Hierarchisierung industrieller Produktionen konnte der Anwendungsbereich der VIBN festgelegt werden.	...in welchem Umfang der Anwendungsbereich der VIBN, bspw. durch Industrie 4.0 verändert wird.
FF4		Die Ableitung von charakteristischen Vorgehensmodellen aus einem allg. Vorgehensmodell konnte anhand von drei Charakteristiken erfolgreich nachgewiesen werden.	...ob sich weitere identifizierte Charakteristiken aus dem allgemeinen Vorgehensmodell ableiten lassen.
FF5		Das Rahmenwerk kombiniert drei Charakteristiken cyber-physischer Produktionssysteme.	...ob und inwiefern ein Schnittstellenkonzept und weitere Charakteristiken integriert werden können.

9.2 Ausblick

Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Arbeit können weiterführende Arbeiten und Ansätze wichtig und sinnvoll sein. Diese weiterführenden Arbeiten und Ansätze werden nachfolgend, in interne- und externe Aspekte des integrierten Vorgehensmodells gegliedert, diskutiert.

Die Ergänzung des Rahmenwerks, um den Aspekt der Schnittstellenkonzeption, kann die Durchgängigkeit des integrierten Vorgehensmodells weiter unterstützen. Da mit den Ergebnissen der Produktionsplanungsphase die Reaktionsstrategien aller Produktionsbereiche festgelegt sind, kann eine frühzeitige Berücksichtigung von dedizierten, konfigurationsbasierten und modulbasierten Schnittstellenkonzepten Bestandteil der Vorgehensschritte sein. Die Eignung des Rahmenwerks auch für physikbasierte virtuelle Inbetriebnahme Prozesse wird in dieser Arbeit nicht nachgewiesen. Dennoch können zusätzlich in der virtuellen Inbetriebnahme abzubildende physikbasierte Prozesse die konkreten Inhalte des Rahmenwerks erweitern und somit für ein breiteres Anwendungsspektrum verfügbar gestalten. Darüber hinaus kann die Anbindung der einzelnen Modellebenen an ein Datenverwaltungswerkzeug die Modellverfügbarkeit und die Modelldokumentation auf allen Ebenen im integrierten Vorgehensmodell zugänglicher gestalten.

Das Rahmenwerk ist in den Produktionsentwicklungsprozess eingebunden und hat umfassende Auswirkungen auf die nachgelagerten Phasen der Produktionsrealisierung und des Produktionsbetriebs. Besonders während des Produktionsbetriebs werden zunehmend digitale Zwillinge zu Monitoring-Zwecken der real existierenden Anlagen eingesetzt. Jedoch bildet der Modellentstehungsprozess vor der virtuellen Inbetriebnahme häufig die modellseitige Grundlage des digitalen Zwilling. Mit den Erkenntnissen aus der Verwendung eines digitalen Zwilling kannen die Vorgehensschritte, durch Aspekte für den digitalen Zwilling, ergänzt werden, sodass ein nachträglicher zusätzlicher Modellierungsaufwand entfallen kann. Eine Anbindung der Werkzeuge für die virtuelle Inbetriebnahme und der Monitoring-Werkzeuge für den digitalen Zwilling an ein übergeordnetes Organisationswerkzeug kann zudem eine durchgängige Verwendung aller Modelldaten sicherstellen. Aus einer ökonomischen Perspektive erscheint eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit aller betrachteten Reaktionsstrategien gegenüber den technologischen Potentialen als ein interessanter Erweiterungsansatz für zukünftige Entscheidungsprozesse während der Produktionsplanungsphase.

V. Literaturverzeichnis

- (Adolphs et al., 2015) Adolphs, P., Bedenbender, H., Dirzus, D., Ehlich, M., Epple, U., Schewe, F., Hankel, M., Walter, A., Heidel, R., Waser, B., Hoffmeister, M., Wollschlaeger, M., Huhle, H. (2015). Reference Architecture Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) https://www.zvei.org/fileadmin/user_upload/Presse_und_Medien/Publikationen/2016/januar/GMA_Status_Report__Reference_Architecture_Model_Industrie_4.0__RAMI_4.0__GMA-Status-Report-RAMI-40-July-2015.pdf.
- (Albers & Gausemeier, 2012) Albers, A. & Gausemeier, J. (2012). Von der fachdisziplinorientierten Produktentwicklung zur vorausschauenden und systemorientierten Produktentstehung. In R. Anderl, M. Eigner, U. Sendler & R. Stark (Hrsg.), *Smart Engineering - Interdisziplinäre Produktentstehung* (S. 17–29). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29372-6>.
- (Albo & Falkman, 2020) Albo, A. & Falkman, P. (2020). A standardization approach to Virtual Commissioning strategies in complex production environments. In *Proceedings of the 30th International Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM)* (51. Aufl., Bd. 30, S. 1251–1258). Procedia Manufacturing. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.175>.
- (Andelfinger & Hänisch, 2017) Andelfinger, V. P. & Hänisch, T. (2017). *Industrie 4.0: Wie cyber-physische Systeme die Arbeitswelt verändern (German Edition)* (1. Aufl. 2017 Aufl.). Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-15557-5>.
- (ASIM, 1997) ASIM. (1997). *Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik* (Arbeitsgemeinschaft Simulation in der Gesellschaft für Informatik: Mitteilungen aus den Fachgruppen, Hrsg.; Nr. 58). <https://docplayer.org/33913792-Leitfaden-fuer-simulationsbenutzer-in-produktion-und-logistik.html>.
- (Assadi et al., 2020) Assadi, A. A., Fries, C., Fechter, M., Maschler, B., Ewert, D., Schnauffer, H.-G., Zürn, M. & Reichenbach, M. (2020). User-friendly, requirement-based assistance for production workforce using an asset administration shell design. In *Proceedings of the 30th CIRP Design Conference* (30. Aufl., Bd. 91, S. 402–406). Procedia CIRP. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.192>.

- (Aßmann, 1996) Aßmann, S. (1996). *Methoden und Hilfsmittel zur abteilungsübergreifenden Projektierung komplexer Maschinen und Anlagen* (WZL Aachen - IPT FHG Aachen, Hrsg.; Nr. 13/96). Shaker Verlag. <http://publications.rwth-aachen.de/record/57651/files/?ln=de>.
- (Aßmann, 1998) Aßmann, G. (1998). Aktionsfelder des Integrierten Änderungsmanagements. In U. Lindemann & R. Reichwald (Hrsg.), *Integriertes Änderungsmanagement* (1. Aufl., S. 107–256). TU München - Lehrstuhl für Konstruktion im Maschinenbau und Lehrstuhl für Allgemeine und Industrielle Betriebswirtschaftslehre. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York.
- (Bach et al., 2017) Bach, N., Brehm, C., Buchholz, W. & Petry, T. (2017). *Organisation: Gestaltung wertschöpfungsorientierter Architekturen, Prozesse und Strukturen* (2. Aufl.). Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-17169-8>.
- (Batra, 2007) Batra, R. (ed.). (2007). Virtually Married - Virtual commissioning of complex production cells. (Siemens AG, Hrsg.) *moveup North America Special - Systems and Solutions for the Automotive Industry, April 2007*, 8–9.
- (Bauernhansl & Miehe, 2020) Bauernhansl, T. & Miehe, R. (2020). Industrielle Produktion – Historie, Treiber und Ausblick. In T. Bauernhansl (Hrsg.), *Fabrikbetriebslehre 1 - Management in der Produktion* (S. 1–33). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-44538-9_1.
- (Beer, 2008) Beer, B. (2008). „Methode“, „Methodik“ und „Methodologie“ in der Ethnologie. In A. Wonneberger (Hrsg.), *Methoden in der Ethnologie* (Jg. 10-2, H. 10/2008, S. 8-23). Ethnoscripts. Hamburg University Press.
- (Bellgran & Säfsten, 2009) Bellgran, M. & Säfsten, E. K. (2009). *Production Development: Design and Operation of Production Systems* (2010. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-495-9>.
- (Bender, 2005) Bender, K. (2005). *Embedded Systems - qualitätsorientierte Entwicklung* (2005. Aufl., Bd. 1). Springer. <https://doi.org/10.1007/b138984>.
- (Berger et al., 2019) Berger, C., Zipfel, A., Braunreuther, S. & Reinhart, G. (2019). Approach for an event-driven production control for cyber-physical production systems. In *Proceedings of the 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing* (Bd. 79, S. 349–354). Procedia CIRP. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.02.085>.

- (Berns et al., 2010) Berns, K., Schürmann, B. & Trapp, M. (2010). *Eingebettete Systeme* (1. Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-9661-2>.
- (Bettenhausen & Kowalewski, 2013) Bettenhausen, K. D. & Kowalewski, S. (2013). *Thesen und Handlungsfelder - Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation* (VDI/VDE-Gesellschaft Vorsitzender des GMA-Fachausschusses Mess- und Automatisierungstechnik (GMA), Hrsg.). <https://www.vdi.de/ueberuns/presse/publikationen/details/cyber-physical-systems-chancen-und-nutzen-aus-sicht-der-automation>.
- (Blessing & Chakrabarti, 2009) Blessing, L. T. M. & Chakrabarti, A. (2009). *DRM, a Design Research Methodology* (2009. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-84882-587-1>.
- (Bliesener et al., 1997) Bliesener, R., Ebel, F., Löffler, C. & KG, F. D. (1997). *Speicherprogrammierbare Steuerungen - Grundstufe* (FESTO Didactic KG, Hrsg.). Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-60678-6>.
- (Bloech et al., 2014) Bloech, J., Bogaschewsky, R., Buscher, U., Daub, A., Götze, U. & Roland, F. (2014). *Einführung in die Produktion* (7. Aufl.). Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-31893-1>.
- (Bodendorf, 2006) Bodendorf, F. (2006). *Daten- und Wissensmanagement* (2. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-28682-9>.
- (Brandstetter & Wehrstedt, 2018) Brandstetter, V. & Wehrstedt, J. C. (2018). A Framework for Multidisciplinary Simulation of Cyber-Physical Production Systems. In *Proceedings of the 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018* (11. Aufl., Bd. 51, S. 809–814). IFAC-PapersOnLine. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.418>.
- (Brandstetter et al., 2018) Brandstetter, V., Wehrstedt, J. C., Meyer, T. & Munske, S. (2018). Virtuelle Inbetriebnahme cyber-physikalischer Produktionssysteme mit gekoppelten Simulationsmodellen. In VDI Automatisierungskongress (AUTOMATION-18): *Leitkongress der Mess- und Automatisierungstechnik / Seamless Convergence of Automation & IT* (19. Aufl., S. 785–798). VDI-Verlag. <https://doi.org/10.51202/9783181023303-785>.
- (Bröhl & Dröschel, 1995) Bröhl, A. P. & Dröschel, W. (1995). *Das V-Modell: Der Standard für die Softwareentwicklung mit Praxisleitfaden* (2., Aufl.). Oldenbourg Wissenschaftsverlag.

- (Brökelmann, 2015) Brökelmann, J. (2015). *Systematik der virtuellen Inbetriebnahme von automatisierten Produktionssystemen* (Universität Paderborn - Fakultät Maschinenbau, Hrsg.; Nr. 344). Dissertation. Verlagsschriftenreihe des Heinz-Nixdorf-Instituts.<https://digital.ub.uni-paderborn.de/hsx/content/titleinfo/1731075>.
- (Broy, 2010) Broy, M. (2010). *Cyber-Physical Systems - Innovation Durch Software-Intensive Eingebettete Systeme*. Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14901-6>.
- (Burggräf et al., 2021) Burggräf, P., Schuh, G., Dannapfel, M., Fuchs, S., Roderburg, A., Schlosser, R. & Tönissen, S. (2021). Produktionsprozessplanung. In P. Burggräf & G. Schuh (Hrsg.), *Fabrikplanung - Handbuch Produktion und Management 4* (2. Aufl., S. 165–224). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-662-61969-8_4.
- (Burr et al., 2007) Burr, H., Mueller, M., & Vielhaber, M. (2007). *EIMS-A Framework for Engineering Process Analysis*. In J.C. Bocquet (ed.) DS 42: Proceedings of ICED 2007, the 16th International Conference on Engineering Design, Paris, France, 28.-31.07. 2007 (pp. 355-356).
- (Burr, 2008) Burr, H. (2008). *Informationsmanagement an der Schnittstelle zwischen Entwicklung und Produktionsplanung* (Universität des Saarlandes - NT - Naturwissenschaftlich- Technische Fakultät, Hrsg.; Nr. 44). Dissertation. <https://doi.org/10.22028/D291-22495>.
- (Calà et al., 2017) Calà, A., Lüder, A., Cachada, A., Pires, F., Barbosa, J., Leitão, P. & Gepp, M. (2017). Migration from Traditional towards Cyber-Physical Production Systems. In *Proceedings of the 15th International Conference on Industrial Informatics (INDIN)* (15. Aufl., S. 147–152). IEEE. <https://doi.org/10.1109/INDIN.2017.8104935>.
- (Chroust, 1992) Chroust, G. (1992). *Modelle der Software-Entwicklung*. IBM Laboratorium Wien. Oldenbourg.
- (Clarivate Analytics, o. D.) Clarivate Analytics. (o. D.). Web of Science. Web of Science. Abgerufen am 7. Juli 2021, von <https://www.webofknowledge.com>.
- (Clark, 2012) Clark, B. (2012). Systems Engineering for Cyber-Physical Products. In *Proceeding of the 6th European Congress on Embedded Real Time Software and Systems* (6. Aufl., S. 1–11). HAL - Archives-Ouvertes. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02263462/document>.

- (Correa, 1994) Correa, H. L. (1994). *The Links Between Uncertainty, Variability of Outputs and Flexibility in Manufacturing Systems*. The University of Warwick. <http://wrap.warwick.ac.uk/35832/>.
- (Cyber-Physical Systems Virtual Organization, o. D.) Cyber-Physical Systems Virtual Organization. (o. D.). *Cyber-Physical Systems Virtual Organization*. <https://cps-vo.org/node/3966>. Abgerufen am 11. Dezember 2021, von <https://cps-vo.org/node/3966>.
- (Czichos, 2019) Czichos, H. (2019). *Mechatronik: Grundlagen und Anwendungen technischer Systeme* (4. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-26294-5>.
- (Damrath, 2018) Damrath, F. (2018). *Physikbasierte mechanische Absicherung zur energieeffizienzorientierten Planung und Auslegung automatisierter Montageanlagen im Automobilbau* (Universität des Saarlandes - Naturwissenschaftlich-Technische Fakultät - Lehrstuhl für Konstruktionstechnik, Hrsg.). Dissertation. Universität des Saarlandes. <https://doi.org/10.22028/D291-28329>.
- (Dangelmaier, 2009) Dangelmaier, W. (2009). *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung*. Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00633-3>.
- (Dassault Systèmes, o. D.) Dassault Systèmes. (o. D.). DELMIA. <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/delmia/>. Abgerufen am 4. Mai 2021, von <https://www.3ds.com/de/produkte-und-services/delmia/>.
- (Decker, 2009) Decker, F. (2009). *Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe* (Technische Universität München - Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik, Hrsg.; Nr. 237). Herbert Utz Verlag. <https://www.utzverlag.de/catalog/book/40996>.
- (Dill, 2003) Dill, C. (2003). *Turbulenzreaktionsprozesse: ein Ansatz zur Steigerung der Reaktionsfähigkeit auf Turbulenzen am Beispiel des Produktionshochlaufs*. (Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik, Hrsg.; Bd. 114). Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe.
- (DIN 32541:1977-05) DIN 32541:1977-05. (1977). *Betreiben von Maschinen und vergleichbaren technischen Arbeitsmitteln; Begriffe für Tätigkeiten*; Deutsche Fassung, Deutsches Institut für Normung.

- (DIN EN 14943:2006-03) DIN EN 14943:2006-03. (2006). *Transportdienstleistungen - Logistik – Glossar*. Deutsche Industrie Norm. <https://dx.doi.org/10.31030/9647863>.
- (DIN EN 81346-1: 2010-05) DIN EN 81346-1: 2010-05. (2010). *Industrielle Systeme, Anlagen und Ausrüstungen und Industrieprodukte – Strukturprinzipien und Referenzkennzeichnung – Teil 1: Allgemeine Regeln*. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2009. <https://dx.doi.org/10.31030/1564880>.
- (DIN EN ISO 12100:2011-03) DIN EN ISO 12100:2011-03. (2011). *Sicherheit von Maschinen - Allgemeine Gestaltungsleitsätze - Risikobeurteilung und Risikominderung* (ISO 12100:2010). Institut d'Estudis Catalans.
- (DIN EN ISO 14001:2015-11) DIN EN ISO 14001:2015-11. (2015). *Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung* (ISO 14001:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14001:2015. <https://dx.doi.org/10.31030/2030481>.
- (DIN EN ISO 9000:2015-11) DIN EN ISO 9000:2015-11. (2015). *Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe* (ISO 9000:2015); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 9000:2015. <https://dx.doi.org/10.31030/2325650>.
- (DIN ISO/TS 15066:2017-04) DIN ISO/TS 15066:2017-04. (2017). *Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter. Technische Regel*. <https://dx.doi.org/10.31030/2584636>.
- (DIN-IEC 60050-351:2014-09) DIN-IEC 60050-351:2014-09. (2014). *Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik* (IEC 60050-351:2013). <https://dx.doi.org/10.31030/2159569>.
- (Dominka, 2007) Dominka, S. (2007). *Hybride Inbetriebnahme von Produktionsanlagen* (Technische Universität München - Informationstechnik im Maschinenwesen & K. Bender, Hrsg.; 1. Aufl.). Sierke.
- (Duden Online Konzept, o. J.) Dudenredaktion (Hrsg.). (o. J.). *Konzept*. Duden online. Abgerufen 24. September 2020, von <https://www.duden.de/node/82609/revision/82645>.
- (Duden Online Methode, o. J.) Dudenredaktion (Hrsg.). (o. J.). *Methode*. Duden online. Abgerufen 2. September 2020, von <https://www.duden.de/node/96408/revision/96444>.
- (Duden Online Methodik, o. J.) Dudenredaktion (Hrsg.). (o. J.). *Methodik*. Duden online. Abgerufen 2. September 2020, von <https://www.duden.de/node/96411/revision/96447>.

- (Duden Online Methodologie, o. J.) Dudenredaktion (Hrsg.). (o. J.). *Methodologie*. Duden online. Abgerufen 2. September 2020, von <https://www.duden.de/node/96418/revision/96454>.
- (Duden Online Ressource, o. J.) Dudenredaktion (Hrsg.). (o. J.). *Ressource*. Duden online. Abgerufen 2. September 2020, von <https://www.duden.de/node/121267/revision/121303>.
- (Ehrensträßer, 2006) Ehrensträßer, M. (2006). Virtuelle Inbetriebnahme - Schlüsseltechnologie für die mechatronische Betriebsmittelkonstruktion. In M. Zäh & G. Reinhart (Hrsg.), *Virtuelle Inbetriebnahme - von der Kür zur Pflicht?* (Bd. 84, S. 6-1-6–21). Technische Universität München - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwb.
- (Elmaraghy, 2005) ElMaraghy, H. A. (2005). Flexible and reconfigurable manufacturing systems paradigms. In *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* (Bd. 17, S. 261–276). Springer. <https://doi.org/10.1007/s10696-006-9028-7>.
- (Elsevier B.V., o. D.) Elsevier B.V. (o. D.). ScienceDirect. ScienceDirect. Abgerufen am 7. Juli 2021, von <https://www.sciencedirect.com/>.
- (Eppich et al., 2012) Eppich, H.-C., Gerick, T., Krah, W. & Spelthahn, S. (2012). Wettbewerbsvorteile durch Knowledge Management am Beispiel der FIDUCIA AG. In A. Gadatsch & R. Franken (Hrsg.), *Integriertes Knowledge Management - Konzepte, Methoden, Instrumente, Fallbeispiele* (1. Aufl., S. 41–59). Vieweg+Teubner Verlag.
- (Erixon, 1998) Erixon, G. (1998). *Modular Function Deployment: A Method for Product Modularisation*. Royal Inst. of Technology, Department of Manufacturing Systems, Assembly Systems Division.
- (Europäisches Parlament & Rat der EU, 2006) Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union (2006). *Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG* (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nr. L, 157, 24.
- (Fandel, 1987) Fandel, G. (1987). *Produktion I: Produktions- Und Kostentheorie* (German Edition) (1. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09461-7>.

- (Fechtelpeter et al., 2019) Fechtelpeter, C., Heim, Y., Löffler, T. & Niewöhner, N. (2019). *Vorstudie zur Entwicklung einer bedarfs- und nutzergerechten Unterstützung von KMU bei der Einführung und Anwendung von Industrie 4.0* (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Hrsg.). MKL Druck GmbH und Co. KG. <https://www.acatech.de/publikation/unterstuetzung-von-kmu-auf-dem-weg-zur-industrie-4-0/>.
- (Fehr et al., 2012) Fehr, S., Sauber, K. & Schmidt, T. (2012). Klassifizierung der Methoden eines Ganzheitlichen Produktionssystems unter Berücksichtigung der Anforderungen indirekter Bereiche. In *Logistics Journal*, 2012, 1–8. https://doi.org/10.2195/lj_Proc_fehr_de_201210_01.
- (Festo Didactic SE, o. D.) Festo Didactic SE. (o. D.). CIROS. <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/CIROS/DE/Download.php>. Abgerufen am 4. Mai 2021, von <https://ip.festo-didactic.com/InfoPortal/CIROS/DE/Download.php>.
- (Fornauf, 2015) Fornauf, L. (2015). *Entwicklung einer Methodik zur Bewertung von Strategien für das dynamische Straßenverkehrsmanagement* (Schriftenreihe des Instituts für Verkehr, Darmstadt, Technische Universität, Hrsg.; Nr. 33). Dissertation. <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/5008>.
- (Francalanza et al., 2017) Francalanza, E., Borg, J. & Constantinescu, C. (2017). A knowledge-based tool for designing cyber physical production systems. In *Computers in Industry* (84. Aufl., S. 39–58). Elsevier B.V. Science Direct. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.08.001>.
- (Francalanza et al., 2018) Francalanza, E., Mercieca, M. & Fenech, A. (2018). Modular System Design Approach for Cyber Physical Production Systems. In *Proceedings of the 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems* (72. Aufl., S. 486–491). Procedia Cirp. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.090>.
- (Frese et al., 2019) Frese, E., Graumann, M., Talaulicar, T. & Theuvsen, L. (2019). *Organisation, Organisationstheorien und Organisationsgestaltung* (11. Aufl.). Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-27054-4>.
- (Ganesan & Dharmaraj, 2019) Ganesan, S. & Dharmaraj, V. (2019). *Software in Loop Virtual Commissioning at Volvo Cars Torslanda* (Chalmers University of Technology - Department of Industrial and Materials Science, Hrsg.). <https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/301111>.

- (Geisberger & Broy, 2015) Geisberger, E. & Broy, M. (2015). *Living in a networked world: Integrated research agenda Cyber-Physical Systems* (agendaCPS) (acatech STUDIE). utzverlag GmbH.
- (Geisberger et al., 2011) Geisberger, E., Cengarle, M. V., Keil, P., Niehaus, J., Thiel, C. & Thönnissen-Fries, H.-J. (2011). *Cyber-Physical Systems - Innovationsmotor für Mobilität, Gesundheit, Energie und Produktion* (acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2011, Hrsg.; 1. Aufl.). Springer, Vorveröffentlichung.
- (Geisberger et al., 2012) Geisberger, E., Broy, M., Cengarle, M. V., Keil, P., Niehaus, J., Thiel, C. & Thönnissen-Fries, H.-J. (2012). *agendaCPS: Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems* (acatech STUDIE, 1) (German Edition) (E. G. Broy & M. Broy, Hrsg.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-29099-2>.
- (Geldsetzer, 1980) Geldsetzer, L. (1980). Methodologie. In J. Ritter, K. Gründer & G. Gabriel (Hrsg.), *Historisches Wörterbuch der Philosophie* (Bd. 5- L - Mn, S. 1379–1386). Schwabe.
- (Glatt & Aurich, 2019) Glatt, M. & Aurich, J. C. (2019). Physical modeling of material flows in cyber-physical production systems. *Procedia Manufacturing*, 28, 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.003>.
- (Goeken, 2006) Goeken, M. (2006). *Entwicklung von Data-Warehouse-Systemen - Anforderungsmanagement, Modellierung, Implementierung* (Philipps-Universität Marburg, Hrsg.). Dissertation. Deutscher Universitäts-Verlag | GWV Fachverlage GmbH. <https://doi.org/10.1007/978-3-8350-9178-8>.
- (Google LLC, o. D.) Google LLC. (o. D.). Google Scholar. Google Scholar. Abgerufen am 7. Juli 2021, von <https://scholar.google.de/>.
- (Graupner, 2010) Graupner, T.-D. (2010). *Vorgehensmodell zur Gestaltung internetbasierter Mehrwertdienste für den Maschinen- und Anlagenbau* (Universität Stuttgart - Institut für industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb, Hrsg.; Nr. 493). Dissertation. Jost-Jetter Verlag. <https://elib.uni-stuttgart.de/bitstream/11682/4310/1/Graupner.pdf>.
- (Greitemann, 2016) Greitemann, J. (2016). *Methodik für die systematische Identifikation von Produktionstechnologien* (Technische Universität München - Fakultät für Maschinenwesen, Hrsg.; FER 000d; WIR 000d). Dissertation. <http://mediatum.ub.tum.de/?id=1292557>.

- (Griesbach et al., 2004) Griesbach, B., Herzog, F. & Ehrenstraßer, M. (2004). Virtuelle Betriebsmittelerstellung im digitalen Werkzeugbau. In M. Zäh & G. Reinhart (Hrsg.), *Virtuelle Produktionsplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik* (Bd. 74, S. 4-1-4-27). Technische Universität München - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwb.
- (Grimske, 2014) Grimske, S. (2014). *Multifunktionale Schnittstellen für kleine modulare Werkzeugmaschinen* (Nr. 34). Berichte aus dem Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik der Helmut-Schmidt-Universität / Universität der Bundeswehr Hamburg. <http://edoc.sub.uni-hamburg.de/hsu/volltexte/2014/3084/>.
- (Gupta & Somers, 1992) Gupta, Y. P. & Somers, T. M. (1996). Business strategy, manufacturing flexibility, and organizational performance relationships: a path analysis approach. *Production and operations management*, 3(5), 204–233. <https://doi.org/10.1111/j.1937-5956.1996.tb00395.x>.
- (Hammerschall, 2008) Hammerschall, U. (2008). *Flexible Methodenintegration in anpassbare Vorgehensmodelle* (Technische Universität München - Institut für Informatik, Hrsg.). Südwestdeutscher Verlag. <http://mediatum.ub.tum.de/doc/645115/file.pdf>.
- (Hammerstingl, 2020) Hammerstingl, V. G. J. (2020). *Steigerung der Rekonfigurationsfähigkeit von Montageanlagen durch Cyber-physische Feldgeräte* (Technische Universität München, Hrsg.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.26067.40489>.
- (Hansen et al., 2017) Hansen, N., Wiechowski, N., Kugler, A., Kowalewski, S., Rambow, T., Busch, R., (2017). Model-in-the-Loop and Software-in-the-Loop Testing of Closed-Loop Automotive Software with Arttest. In: Eibl, M. & Gaedke, M. (Hrsg.), *INFORMATIK 2017*. Gesellschaft für Informatik, Bonn. (S. 1537-1549). https://doi.org/10.18420/in2017_154.
- (Harashima et al., 1996) Harashima, F., Tomizuka, M. & Fukuda, T. (1996). Mechatronics - „What Is It, Why, and How?“ An editorial. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 1(1), 1–4. <https://doi.org/10.1109/tmech.1996.7827930>.
- (Hasler Roumois, 2013) Hasler Roumois, U. (2013). *Studienbuch Wissensmanagement: Grundlagen der Wissensarbeit in Wirtschafts-, Non-Profit- und Public-Organisationen* (3. Aufl.). Orell Füssli.

- (Heidari & Salamon, 2012) Heidari, A. & Salamon, O. (2012). *Virtual Commissioning of an Existing Manufacturing Cell at Volvo Car Corporation Using DELMIA V6* (Chalmers University of Technology - Department of Signals and Systems, Hrsg.; Bd. EX023). <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/157312.pdf>.
- (Heisig, 2016) Heisig, P. (2016). *Abstraktion verteilter Produktionsmaschinen in cyber-physischen Produktionssystemen* (Technische Universität Dresden, Hrsg.). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35828.96645>.
- (Hengel, 1994) Hengel, K. (1994). *Softwareentwicklung für speicherprogrammierbare Steuerungen im integrierten, rechnergestützten Konstruktionsprozeß* (IPA-IAO - Forschung und Praxis (190)) (1. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-47955-7>.
- (Henning et al., 2015) Henning, S., Brandenbourger, B., Helbig, T. & Niggemann, O. (2015). Plug-and-Produce für Cyber-Physische-Produktionssysteme - Eine Fallstudie im OPAK-Projekt. In *Proceedings of the 2015 Automation Conference - Baden-Baden* (S. 1–12). Verband Deutscher Ingenieure VDI.
- (Hoeschen, 2015) Hoeschen, A. (2015). *Komplexitätsorientierte Wertschöpfungsverteilung in multinationalen Produktionssystemen* (Nr. HT018961102). <http://publications.rwth-aachen.de/record/572767/files/572767.pdf>.
- (Hoffmann, 2016) Hoffmann, P. (2016). *On Virtual Commissioning of Manufacturing Systems – Proposals for a systematic VC simulation study methodology and a new simulation model building approach* (doctoral dissertation, University of South Wales/ Welsh: Prifysgol De Cymru, Hrsg.).
- (Hornby, 2000) Hornby, A. S., Ashby, M. & Wehmeier, S. (2000). *Oxford Advanced Learner's Dictionary of Current English* (6. Aufl.). Cornelsen & Oxford University Press.
- (Huber, 2016) Huber, W. (2016). *Industrie 4.0 in der Automobilproduktion* (1. Aufl.). Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-12732-9>.
- (Hult, 1996) Hult, C. A. (1996). *Researching and Writing in the Sciences and Technology*. Allyn & Bacon.
- (IEC 61512) IEC 61512-1:1997. (1997). *Batch control – Part 1: Models and terminology* (CEI/IEC 61512-1:1997) Englisch-Französische Fassung. Internationale Norm.

- (IEC 62264-1:2013) IEC 62264-1:2013. (2013). *Integration von Unternehmensführungs- und Leitsystemen - Teil 1: Modelle und Terminologie* (IEC 62264-1:2013); Deutsche Fassung EN 62264-1:2013. Beuth Publishing. <https://dx.doi.org/10.31030/2156368>.
- (IEEE, o. D.) IEEE. (o. D.). IEEE-Xplore. IEEE-Xplore (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Abgerufen am 7. Juli 2021, von <https://ieeexplore.ieee.org/>.
- (IEEE S.C.C., 1990) IEEE Standards Coordinating Committee. (1990). *IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology* (IEEE Std 610.12-1990). Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society.
- (Illmer & Vielhaber, 2017) Illmer, B. & Vielhaber, M. (2017). Auswirkungen hochvernetzter Systeme auf die Modellarchitektur der virtuellen Inbetriebnahme. In K. Brökel, K.-H. Grote, R. Stelzer, F. Rieg, J. Feldhusen, N. Müller, P. Köhler & A. Lohrengel (Hrsg.), *Konferenzband: 15. Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017 – Interdisziplinäre Produktentwicklung* (15. Aufl., S. 297–306). Duisburg-Essen Publications online. <https://doi.org/10.17185/DUEPUBLICO/44616>.
- (Illmer & Vielhaber, 2018) Illmer, B. & Vielhaber, M. (2018). Virtual validation of decentrally controlled manufacturing systems with cyber-physical functionalities. In *Proceedings of the 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS)* (51. Aufl., Bd. 72, S. 509–514). Procedia CIRP. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.03.195>.
- (Illmer & Vielhaber, 2020) Illmer, B. & Vielhaber, M. (2020). Cyber-physical systems and production characteristics - classification and visualization of relationships. In *Proceedings of the 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS)* (53. Aufl., Bd. 93, S. 186–191). Procedia CIRP. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.077>.
- (Illmer & Vielhaber, 2021) Illmer, B. & Vielhaber, M. (2021). Describing cyber-physical systems using production characteristics and methodical integration into virtual commissioning. In *Proceedings of the 8th CIRP Conference on Assembly Technology and Systems (CIRP-CATS)* (97. Aufl., S. 272–277). Procedia CIRP. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.237>.
- (ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH, o. D.) ISG Industrielle Steuerungstechnik GmbH. (o. D.). ISG - Virtuos. <https://www.isg-stuttgart.de/de/isg-virtuos/virtuelle-inbetriebnahme.html>. Abgerufen am 4. Mai 2021, von <https://www.isg-stuttgart.de/de/isg-virtuos/virtuelle-inbetriebnahme.html>.

- (Jablonski et al., 1997) Jablonski, S., Böhm, M. & Schulze, W. (1997). *Workflow-Management* (1. Aufl.). Dpunkt Verlag.
- (Jösslin, 2014) Jösslin, A. (2014, Februar). *Erfahrungsbericht zur Inbetriebnahme von Anlagen im Systemverbund* [Erfahrungsbericht]. <https://docplayer.org/34409657-Erfahrungsbericht-zur-inbetriebnahme-von-anlagen-im-systemverbund-andreas-joesslin-db-services-gmbh-leiter-start-up.html>.
- (Kagermann et al., 2011) Kagermann, H., Lukas, W.-D. & Wahlster, W. (2011, 1. April). Industrie 4.0: Mit dem Internet der Dinge auf dem Weg zur 4. industriellen Revolution. *VDI Nachrichten*.
https://www.dFKI.de/fileadmin/user_upload/DFKI/Medien/News_Media/Presse/Presse-Highlights/vdinach2011a13-ind4.0-Internet-Dinge.pdf.
- (Kagermann et al., 2013) Kagermann, H., Wahlster, W. & Helbig, J. (Hrsg.). (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V.,
https://www.acatech.de/wp-content/uploads/2018/03/Abschlussbericht_Industrie4.0_barrierefrei.pdf.
- (Kamitz, 1980) Kamitz, R. (1980). Methode, Methodologie. In J. Speck (Hrsg.), *Handbuch wissenschaftstheoretischer Begriffe* (Bd. 2- G - Q, S. 429 ff.). Vandenhoeck & Ruprecht.
- (Keil, 2017) Keil, S. (2017). Design of a cyber-physical production system for semiconductor manufacturing. In *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)* (23. Aufl., S. 319–340). Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft Leibniz Information Centre for Economics.
<https://doi.org/10.15480/882.1458>.
- (Kellner et al., 2020) Kellner, F., Lienland, B. & Lukesch, M. (2020). *Produktionswirtschaft: Planung, Steuerung und Industrie 4.0* (2. Aufl.). Springer Gabler.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61446-4>.

- (Kiefer, 2007) Kiefer, J. (2007). *Mechatronikorientierte Planung automatisierter Fertigungszellen im Bereich Karosserierohbau* (Universität des Saarlandes - Lehrstuhl für Fertigungstechnik, H. Bley & C. Weber, Hrsg.; Nr. 43). Universität des Saarlandes - Schriftenreihe Produktionstechnik. https://publikationen.sulb.uni-saarland.de/bitstream/20.500.11880/22487/1/Dissertation_Jens_Kiefer.pdf.
- (Kiefer, 2011) Kiefer, J. (2011). Virtuelle Inbetriebnahme als mechatronische Simulationsmethode – Umsetzungsstand bei der Daimler AG. In G. Reinhart & M. Zäh (Hrsg.), *Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung* (Bd. 101, S. 2-1-2-7). Technische Universität München - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwb.
- (Kiefer & Bergholz, 2006) Kiefer, J., Bergholz, W. (2006). Virtuelle Inbetriebnahme - Hürden und Wege in die operative Praxis. In M. Zäh & G. Reinhart (Hrsg.), *Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?* (S. 2-1 – 2-20). Technische Universität München - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwb.
- (Kiefer & Borutta, 2010) Kiefer, J. & Borutta, H. (2010). *Virtuelle Inbetriebnahme im Rohbau Werk Wörth* [Präsentationssfolien]. Fachkongress Digitale Fabrik @Produktion <https://www.yumpu.com/de/document/read/3858090/virtuelle-inbetriebnahme-im-rohbau-werk-worth/9>.
- (Ko et al., 2013) Ko, M., Ahn, E. & Park, S. C. (2013). A concurrent design methodology of a production system for virtual commissioning. *Concurrent Engineering*, 21(2), 129–140. <https://doi.org/10.1177/1063293x13476070>.
- (Kolberg et al., 2016) Kolberg, D., Berger, C., Pirvu, B.-C., Franke, M. & Michniewicz, J. (2016). CyProF – Insights from a Framework for Designing Cyber-Physical Systems in Production Environments. In *Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems* (57. Aufl., S. 32–37). Procedia CIRP. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.007>.
- (Kövari, 2011) Kövari, L. (2011). *Konzeption und Realisierung eines neuen Systems zur produktbegleitenden virtuellen Inbetriebnahme komplexer Förderanlagen* (Karlsruher Institut für Technologie - Fakultät für Maschinenbau, Hrsg.; Nr. 35). KIT - Scientific Publishing. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000021695>.

- (Kowalewski et al., 2012) Kowalewski, S., Rumpe, B. & Stollenwerk, A. (2012). Cyber-Physical Systems -- eine Herausforderung an die Automatisierungstechnik?. In *Proc. Automation 2012*, VDI Berichte 2012, VDI-Verlag, S. 113-116.
- (Kring, o. J.) Kring, F. (o. J.). *INBETRIEBSETZUNG ODER INBETRIEBNAHME? WARUM SIE GENAU HINSCHAUEN SOLLTEN*. weka-manager-ce. Abgerufen 5. Oktober 2020, von <https://www.weka-manager-ce.de/maschinenrichtlinie/inbetriebsetzung-oder-inbetriebnahme-warum-sie-genau-hinschauen-sollten/>.
- (Kufner, 2012) Kufner, A. (2012). *Automatisierte Erstellung von Maschinenmodellen für die Hardware-in-the-Loop-Simulation von Montagemaschinen* (Universität Stuttgart - Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen, Hrsg.; Nr. 188). Jost-Jetter Verlag. <https://doi.org/10.18419/opus-6786>.
- (KUKA Deutschland GmbH Sales, o. D.) KUKA Deutschland GmbH Sales. (o. D.). <https://www.kuka.com/>. Abgerufen am 22. Dezember 2021, von <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter/lbr-iiwa>.
- (Labbus, 2021) Labbus, I. (2021). *Cyber-physische Produktionssysteme für die energieeffiziente Komponentenproduktion* (Nr. 152). Volkswagen Aktiengesellschaft - AutoUni - Schriftenreihe. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32828-3>.
- (Lacour, 2011) Lacour, F.-F. (2011). *Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen* (Technische Universität München, Hrsg.; Nr. 257). Dissertation. Herbert Utz Verlag. https://www.mw.tum.de/fileadmin/w00btw/iwb/Institut/Dissertationen/257_Lacour.pdf.
- (Lager, 2020) Lager, H. (2020). *Anpassungsfähigkeit in Zeiten der Digitalisierung*. Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-29173-0>.
- (Landherr et al., 2013) Landherr, M., Neumann, M., Volkmann, J., Jäger, J., Kluth, A., Lucke, D., Rahman, O.-A., Rixinger, G. & Constantinescu, C. (2013). Fabriklebenszyklusmanagement. In E. Westkämper, D. Spath, C. Constantinescu & J. Lentes (Hrsg.), *Digitale Produktion* (1. Aufl., S. 163–195). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-20259-9>.

- (Lechler & Schlechtendahl, 2016) Lechler, A. & Schlechtendahl, J. (2016). Steuerung aus der Cloud. In T. Bauernhansl, T. M. Hompel & B. Vogel-Heuser (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1: Produktion* (2. Aufl., Bd. 1, S. 61–74). Springer Vieweg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-45279-0_27.
- (Lee, 2006) Lee, E. A. (2006). *Cyber-Physical Systems - Are Computing Foundations Adequate?* NSF Workshop On Cyber-Physical Systems: Research Motivation, Techniques and Roadmap, Austin, Texas.
- (Lee & Park, 2014) Lee, C. G. & Park, S. C. (2014). Survey on the virtual commissioning of manufacturing systems. *Journal of Computational Design and Engineering*, 1(3), 213–222. <https://doi.org/10.7315/jcde.2014.021>.
- (Lee & Seshia, 2011) Lee, E. A. & Seshia, S. A. (2011). *Introduction to Embedded Systems - A Cyber-Physical Systems Approach* (1 ed., v. 1.08 Aufl.). UC Berkeley.
- (Lee et al., 2015) Lee, J., Bagheri, B. & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. In *Manufacturing Letters* (Bd. 3, S. 18–23). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>.
- (Leitão et al., 2016) Leitão, P., Colombo, A. W. & Karnouskos, S. (2016). Industrial automation based on cyber-physical systems technologies: Prototype implementations and challenges. *Computers in Industry*, 81, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2015.08.004>.
- (Lindemann & Reichwald, 1998) Lindemann, U. & Reichwald, R. (1998). *Integriertes Änderungsmanagement* (1. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-71957-8>.
- (Lindworsky, 2011) Lindworsky, A. (2011). *Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest* (Technische Universität München - Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Hrsg.; Nr. 249). Herbert Utz Verlag. <https://www.utzverlag.de/catalog/book/44125>.
- (Lochbiechler et al., 2012) Lochbiechler, M., Schmüdderrich, T., Brökelmann, J. & Trächtler, A. (2012). Methodology for Selecting the Modeling Depth of Object-Oriented Behavioral Models. In *Proceedings of the World Academy of Science, Engineering and Technology, WASET* (S. 327–331). World Academy of Science, Engineering and Technology.

- (Lödding, 2016) Lödding, H. (2016). *Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration* (VDI-Buch) (3. Aufl. 2016 Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48459-3>.
- (Lohse et al., 2020) Lohse, O., Krause, S., Saal, C. & Lipp, C. (2020). Real Time Reaction Concept for Cyber Physical Production Systems. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS)* (3. Aufl., S. 1–5). IEEE. <https://doi.org/10.1109/SIMS49386.2020.9121473>.
- (Lüder et al., 2017) Lüder, A., Schmidt, N., Hell, K., Röpke, H. & Zawisza, J. (2017). Fundamentals of Artifact Reuse in CPPS. In *Multi-Disciplinary Engineering for Cyber-Physical Production Systems* (S. 113–138). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-56345-9_5.
- (machineering GmbH & Co. KG & Wünsch, 2020) machineering GmbH & Co. KG & Wünsch, G. (2020). *Interview mit Dr. Wünsch zur virtuellen Inbetriebnahme.* www.machineering.com/https://www.machineering.com/blog/wissen/article/virtuelleinbetriebnahme-in-praxis/.
- (Marik & McFarlane, 2005) Marik, V. & McFarlane, D. (2005). Industrial Adoption of Agent-Based Technologies. *IEEE Intelligent Systems*, 20(1), 27–35. <https://doi.org/10.1109/mis.2005.11>.
- (Markert, 2012) Markert, F. (2012). *Formale Anforderungsanalyse und Testunterstützung im Produktlinienkontext*. Diplomarbeit, Technische Universität Darmstadt.
- (Marwedel & Wehmeyer, 2008) Marwedel, P. & Wehmeyer, L. (2008). *Eingebettete Systeme*. Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-34049-2>.
- (Megretski et al., 2006) Megretski, A., Mitter, S., Ozdaglar, A. & Parrilo, P. (2006). [PDF] *NSF Workshop in Cyber-Physical Systems / Semantic Scholar*. <https://www.semanticscholar.org/.https://www.semanticscholar.org/paper/NSF-Workshop-in-Cyber-Physical-Systems-Megretski-Mitter/0df43796223b408ae7cd15d46db0b075393113f1>.
- (Meixner, 2020) Meixner, K. (2020). Integrating Variability Modeling of Products, Processes, and Resources in Cyber-Physical Production Systems Engineering. In *Proceedings of the 24th ACM International Systems and Software Product Line Conference: Bd. B* (24. Aufl., S. 96–103). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3382026.3431247>.

- (Meixner et al., 2020) Meixner, K., Lüder, A., Herzog, J., Röpke, H. & Biffl, S. (2020). Modeling Expert Knowledge for Optimal CPPS Resource Selection for a Product Portfolio. In *Proceedings of the 25th International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (25. Aufl., S. 1687–1694). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9212067>.
- (Metzner et al., 2019a) Metzner, M. (2019a). Intuitive Interaction with Virtual Commissioning of Production Systems for Design Validation. In L. Krieg, J. Merhof, T.K. & J. Franke (Hrsg.), *Proceedings of the 29th CIRP Design Conference* (84. Aufl., S. 892–895). Procedia Cirp. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.08.004>.
- (Metzner et al., 2019b) Metzner, M. (2019b). Virtual Commissioning of 6 DoF Pose Estimation and Robotic Bin Picking Systems for Industrial Parts. In S. Weissert, E. Karlidag, F. Albrecht, A. Blank, A. Mayr & J. Franke (Hrsg.), *Proceedings of the 13th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems (IMS)* (52. Aufl., Bd. 10, S. 160–164). IFAC-PapersOnLine. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.10.040>.
- (Mewes & Partner GmbH, o. D.) Mewes & Partner GmbH. (o. D.). WinMOD. <https://www.winmod.de/de/>. Abgerufen am 4. Mai 2021, von <https://www.winmod.de/de/>.
- (Meyer, 2014) Meyer, T. (2014). *Wirtschaftliche Erstellung Von Emulationsmodellen Fur Die Virtuelle Inbetriebnahme (Autouni - Schriftenreihe) (German Edition)* (Bd. 53). Logos Verlag Berlin.
- (Meyer et al., 2018) Meyer, T., Munske, S., Weyer, S., Brandstetter, V., Wehrstedt, J. C. & Keinan, M. (2018). Classification of application scenarios for a virtual commissioning of CPS-based production plants into the reference architecture RAMI 4.0. In *VDI Automatisierungskongress (AUTOMATION-18): Seamless Convergence of Automation & IT, 3.–4. Juli, Baden-Baden, Germany, VDI Verlag, Düsseldorf, 2018.* (S. 1–11). VDI-Verlag.
- (Michniewicz, 2019) Michniewicz, J. J. (2019). *Automatische simulationsgestützte Arbeitsplanung in der Montage* (Technische Universität München - Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik, Hrsg.). Utz Verlag. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1442360/document.pdf>.

- (Michniewicz & Reinhart, 2014) Michniewicz, J. & Reinhart, G. (2014). Cyber-physical robotics – automated analysis, programming and configuration of robot cells based on Cyber-Physical-Systems. In *Proceedings of the 2nd International Conference on System-Integrated Intelligence: Challenges for Product and Production Engineering* (2. Aufl., Bd. 15, S. 566–575). Procedia Technology. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.017>.
- (Monostori, 2014) Monostori, L. (2014). Cyber-physical production systems: roots from manufacturing science and technology. In: *Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems - Variety Management in Manufacturing*. (Vol. 17, S. 9-13, ed. Hoda ElMaraghy). <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.115>.
- (Mortensen & et al., 2017) Mortensen, S. T., Chrysostomou, D. & Madsen, O. (2017). A novel framework for virtual recommissioning in reconfigurable manufacturing systems. In *Proceedings of the 22nd International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (Bd. 22, S. 1–4). IEEE Publishing. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247744>.
- (Mortensen & Madsen, 2018) Mortensen, S. T. & Madsen, O. (2018). A Virtual Commissioning Learning Platform. In *Procedia Manufacturing*, 23, 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.167>.
- (Mortensen & Madsen, 2019) Mortensen, S. T. & Madsen, O. (2019). Operational Classification and Method for Reconfiguration & Recommissioning of Changeable Manufacturing Systems on System Level. In *Proceedings of the 7th International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV)* (Bd. 28, S. 90–95). Procedia Manufacturing, 28. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.12.015>.
- (Müller et al., 2018) Müller, D., Schumacher, C. & Zeidler, F. (2018). Intelligent Adaption Process in Cyber-Physical Production Systems. In *Lecture Notes in Computer Science - International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods (ISoLA 2018) - Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Distributed Systems* (Bd. 11246, S. 411–428). Springer Link. https://doi.org/10.1007/978-3-030-03424-5_28.
- (N.N., 1897) N.N. (1897). *Meyers Konversationslexikon* (5. Aufl.). Verlag des Bibliographischen Instituts Leipzig und Wien.

- (N.N., 2013) o. A. (2013). *Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0. Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0* (Promotorengruppe Kommunikation der Forschungsunion Wirtschaft – Wissenschaft, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V., Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Deutsche Post AG, H. Kagermann, W. Wahlster & J. Helbig, Hrsg.). <https://www.acatech.de/publikation/umsetzungsempfehlungen-fuer-das-zukunftsprojekt-industrie-4-0-abschlussbericht-des-arbeitskreises-industrie-4-0/>.
- (Nordsiek, 2012) Nordsiek, D. (2012). *Systematik zur Konzipierung von Produktionssystemen auf Basis der Prinziplösung mechatronischer Systeme* (Universität Paderborn, Hrsg.; Nr. 304). Heinz-Nixdorf-Institut (Verlag). https://www.hni.uni-paderborn.de/en/publications/publikationen/?tx_hnippview_pi1%5Bpublikation%5D=7713.
- (North, 2011) North, K. (2011). *Wissensorientierte Unternehmensführung: Wertschöpfung durch Wissen* (5. Aufl.). Gabler Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-6427-4>.
- (Novak et al., 2017) Novak, P., Kadera, P. & Wimmer, M. (2017). Model-based engineering and virtual commissioning of cyber-physical manufacturing systems – Transportation system case study. In *Proceedings of the 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation* (S. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2017.8247743>.
- (Nyhuis et al., 2008) Nyhuis, P., Reinhart, G. & Abele, E. (2008). *Wandlungsfähige Produktionssysteme: Heute die Industrie von morgen gestalten* (1., Aufl.). TEWISS.
- (Obrecht, 2007) Obrecht, W. (2007). *Was ist Wissenschaft? - Die naturalistische Sicht des Wissenschaftlichen Realismus*. Deutsche Gesellschaft für Soziale Arbeit. https://w3mediapool.hm.edu/mediapool/media/fk11/fk11_lokal/forschung/publikationen/lehrmaterialen/dokumente_112/sagebiel_1/Obrecht-07-Okt-Was_ist_Wissenschaft_m_Anh_.pdf.

- (Oestreicher, 1986) Oestreicher, T. (1986). *Rechnerunterstützte Projektierung von Steuerungssystemen* (Fakultät für Maschinenbau - Universität Karlsruhe, Hrsg.; Nr. 9). Schnelldruck Ernst Grässer, Karlsruhe. <https://katalog.slub-dresden.de/id/0-131091948>.
- (Oswald, 2006) Oswald, D. (2006). *Design & Methods - Design Methods for innovation in Design Process*. Dennis Oswald Blog - Master Thesis. <http://www.dennis-oswald.de/BLOG/?cat=34>.
- (Parthasarthy & Sethi, 1993) Parthasarthy, R. & Sethi, S. P. (1993). Relating Strategy and Structure to Flexible Automation: A Test of Fit and Performance Implications. *Strategic Management Journal*, 7(14), 529–549. <https://www.jstor.org/stable/2486716>.
- (Pfrommer et al., 2013) Pfrommer, J., Schleipen, M. & Beyerer, J. (2013). PPRS: Production skills and their relation to product, process, and resource. In *IEEE 18th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)* (Bd. 18, S. 1–4). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2013.6648114>.
- (Puntel Schmidt, 2017) Puntel Schmidt, P. (2017). *Methoden zur simulationsbasierten Absicherung von Steuerungscode fertigungstechnischer Anlagen* (Helmut Schmidt Universität - Institut für Automatisierungstechnik, Hrsg.). <https://dnb.info/1130788792/34>.
- (Rehäuser & Krcmar, 1996) Rehäuser, J. & Krcmar, H. (1996). Wissensmanagement im Unternehmen. In G. Schreyögg & P. Konrad (Hrsg.), *Wissensmanagement* (6. Jg., S. 1–40). Gabler Verlag.
- (Reimann & VDMA, 2017) Reimann, G. & VDMA. (2017). *Simulation und Visualisierung - Erste Ergebnisse der Trendbefragung* [Vorlesungsfolien]. <http://informatik.vdma.org/>. http://informatik.vdma.org/documents/15012668/20460216/Trend-Analyse-Simulation_Internet_1505303416307_1565872403456.pdf/7a303a7e-3e02-4056-3032-a023c08bf004.

- (Reinhart et al., 2013) Reinhart, G., Engelhardt, P., Geiger, F., Philipp, T. R., Wahlster, W., Zühlke, D., Schlick, J., Becker, T., Löckelt, M., Pirvu, B., Stephan, P., Hodek, S., Scholz-Reiter, B., Thoben, K., Gorlitz, C., Hribernik, K. A., Lappe, D. & Veigt. (2013). Cyber-Physische Produktionssysteme. Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. *Werkstatttechnik (wt-) Online*, 103(2)(Sonderausgabe Industrie 4.0), 84–89. https://www.researchgate.net/publication/298092830_Cyber-physische_Produktionssysteme_Prodktivitats-_und_Flexibilitatssteigerung_durch_die_Vernetzung_intelligenter_Systeme_in_der_Fabrik.
- (ResearchGate GmbH, o. D.) ResearchGate GmbH. (o. D.). ResearchGate. Research Gate. Abgerufen am 20. Juli 2021, von <https://www.researchgate.net/>.
- (Ribeiro, 2017) Ribeiro, L. (2017). Cyber-physical production systems' design challenges. In *IEEE 26th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)* (26. Aufl., S. 1189–1194). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ISIE.2017.8001414>.
- (Ribeiro & Björkman, 2017) Ribeiro, L. & Björkman, M. (2017). Transitioning From Standard Automation Solutions to Cyber- Physical Production Systems: An Assessment of Critical Conceptual and Technical Challenges. *IEEE Systems Journal*, 4(12), 3816–3827. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2017.2771139>.
- (Roman et al., 2018) Roman, R., Radovan, H. & Rolando, D. S. D. (2018). Virtual Commissioning of a Robotic Cell Prior to its Implementation into a Real Flexible Production System.: Generation of the Robot Offline Programming (OLP) and Validation of the PLC Code. In *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology* (26. Aufl., Bd. 42, S. 93–101). Slovak University of Technology in Bratislava - Faculty of Materials Science and Technology in Trnava - Institute of Production Technologies. <https://doi.org/10.2478/rput-2018-0011>.
- (Ropohl, 2009) Ropohl, G. (2009). *Allgemeine Technologie: eine Systemtheorie der Technik* (3. Aufl.). Karlsruhe KIT Scientific Publishing. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000011529>.
- (Rueckert et al., 2020) Rueckert, P., Muenkewarf, S. & Tracht, K. (2020). Human-in-the-loop simulation for virtual commissioning of human-robot-collaboration. In *13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering* (88. Aufl., S. 229–233). Procedia CIRP 88. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.041>.

- (Ruskowski, o. D.) Ruskowski, M. (o. D.). *Verwaltungsschale*. www.smartfactory.de. Abgerufen am 27. Mai 2021, von <https://smartfactory.de/verwaltungsschale/>.
- (Schamp et al., 2018) Schamp, M., Hoedt, S., Claeys, A., Aghezzaf, E. H. & Cottyn, J. (2018). Impact of a virtual twin on commissioning time and quality. In *16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing INCOM 2018* (51. Aufl., Bd. 11, S. 1047–1052). IFAC-PapersOnLine. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.469>.
- (Schamp et al., 2019) Schamp, M., Van De Ginste, L., Hoedt, S., Claeys, A., Aghezzaf, E. H. & Cottyn, J. (2019). Virtual Commissioning of Industrial Control Systems-a 3D Digital Model Approach. In *28th International Conference in Production Research Manufacturing Innovation: Cyber-Physical Manufacturing* (39. Aufl., S. 66–73). Procedia Manufacturing. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.229>.
- (Schauf, 2016) Schauf, C. (2016). Anforderungen von Produktionsplanern an die Simulation - Discrete-Rate-Simulation als Ergänzung zur ereignisdiskreten Simulation in der Produktion. In M. Schenk, H. Zadek, G. Müller, K. Richter & H. Seidel (Hrsg.), *21. Magdeburger Logistiktage - Logistik neu denken und gestalten - Tagungsband* (21. Aufl., S. 143–148). Otto von Guericke Universität Magdeburg - Institut für Logistik und Materialflusstechnik & Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF).
- (Scheifele, 2019) Scheifele, C. (2019). *Plattform zur Echtzeit-Co-Simulation für die virtuelle Inbetriebnahme* (Universität Stuttgart - Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, Hrsg.; Nr. 95). Dissertation. Fraunhofer Verlag. <https://doi.org/10.18419/opus-10742>.
- (Schleipen et al., 2015) Schleipen, M., Lüder, A., Sauer, O., Flatt, H. & Jasperneite, J. (2015). Requirements and concept for Plug-and-Work. at – Automatisierungstechnik, 63(10), 801–820. <https://doi.org/10.1515/auto-2015-0015>.
- (Schmidt, 2002) Schmidt, G. (2002). *Einführung in die Organisation: Modelle - Verfahren - Techniken (German Edition)* (2. Aufl.). Gabler Verlag.
- (Schmidt, 2008) Schmidt, A. (2008). Fallbeispiel Sennheiser – Wandlungsfähigkeit – ein Hebel zur Wertschöpfungsmaximierung von Produktionsunternehmen. In *Wandlungsfähige Produktionssysteme – Heute die Industrie von morgen gestalten* (S. 108–123). Garbsen. <https://doi.org/10.2314/GBV:633626406>.

- (Schmüdderrich et al., 2013) Schmüdderrich, T., Lochbiechler, M. & Trächtler, A. (2013). Methodik zur anforderungsgerechten Wahl der Modellierungstiefe von Verhaltensmodellen für die virtuelle Inbetriebnahme. In T. Bertram, B. Corves & K. Janschek (Hrsg.), *Fachtagung Mechatronik 2013* (S. 43–48). VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (VDI-GPP); VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (VDI/VDE-GMA).
- (Scholer, 2018) Scholer, M. (2018). *Wandlungsfähige und angepasste Automation in der Automobil-montage mittels durchgängigem modularem Engineering - Am Beispiel der Mensch-Roboter-Kooperation in der Unterbodenmontage* (Universität des Saarlandes - NT - Naturwissenschaftlich- Technische Fakultät, Hrsg.). Dissertation. <https://doi.org/10.22028/D291-27801>.
- (Scholz-Reiter et al., 2011) Scholz-Reiter, B., Görges, M., Jagalski, T. & Sowade, S. (2011). *Vorgehensmodell zur Entwicklung von Selbststeuerungsstrategien. Industrie Management*, 27(1), 55–58. <http://www.sfb637.uni-bremen.de/pubdb/repository/SFB637-A5-11-004-IIJ.pdf>.
- (Schreyögg & Geiger, 2015) Schreyögg, G. & Geiger, D. (2015). *Organisation: Grundlagen moderner Organisationsgestaltung. Mit Fallstudien (German Edition)* (6., vollst. überarb. u. erw. Aufl. 2016 Aufl.). Springer Gabler. <https://doi.org/10.1007/978-3-8349-4485-6>.
- (Schuhmacher & Hummel, 2016) Schuhmacher, J. & Hummel, V. (2016). Decentralized Control of Logistic Processes in Cyber-physical Production Systems at the Example of ESB Logistics Learning Factory. *Proceeding of the 6th CIRP Conference on Learning Factories (CLF)*, 54, 19–24. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.04.095>.
- (Schumann & Gerisch, 1984) Schumann, J. & Gerisch, M. (1984). *Software-Entwurf: Prinzipien, Methoden, Arbeitsschritte, Rechnerunterstützung* (1. Aufl.). VEB Verlag Technik Berlin.
- (Selzer, 2018) Selzer, T. (2018). *Virtuelle Inbetriebnahme flexibler Produktionsstationen entlang einer heterogenen Softwarelandschaft* (Universität des Saarlandes - Lehrstuhl für Konstruktionstechnik & Zentrum für Mechatronik und Automatisierungstechnik (ZeMA) gGmbH, Hrsg.).
- (Sethi & Sethi, 1990) Sethi, A. K. & Sethi, S. P. (1990). Flexibility in manufacturing: A survey. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 2, 289–328. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00186471>.

- (SEW-EURODRIVE, o. D.) SEW-EURODRIVE. (o. D.). *SEW Eurodrive - Fahrerlose Transportfahrzeuge für die Montage*. www.sew-eurodrive.de. Abgerufen am 22. Mai 2021, von <https://www.sew-eurodrive.de/automatisierung/fabriksautomatisierung/mobile-assistenzsysteme/montageassistenten/montageassistenten.html>.
- (Siebert, 2010) Siebert, H. (2010). *Methoden für die Bildungsarbeit: Leitfaden für aktivierendes Lehren* (4. Aufl.). wbv Media GmbH.
- (Siemens AG, o. D.) Siemens AG. (o. D.). *Tecnomatix Process Simulate*. <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/webinar/process-simulate/76807>. Abgerufen am 4. Mai 2021, von <https://www.plm.automation.siemens.com/global/de/webinar/process-simulate/76807>.
- (Sinz, 2003) Sinz, C. (2003). *Verifikation regelbasierter Konfigurationssysteme* (Fakultät für Informations- und Kognitionswissenschaften, Eberhard-Karls-Universität Tübingen, Hrsg.). <https://d-nb.info/969942230/34>.
- (Slack, 1987) Slack, N. (1987). The Flexibility of Manufacturing Systems. *International Journal of Operations & Production Management*, 4(7), 35–45. <https://doi.org/10.1108/eb054798>.
- (Soder, 2017) Soder, J. (2017). Use Case Production - Von CIM über Lean Production zu Industrie 4.0. In B. Vogel-Heuser, T. Bauernhansl & M. ten Hompel (Hrsg.), *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1* (2. Aufl., Bd. 1, S. 3–26). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45279-0>.
- (Sossenheimer, 1989) Sossenheimer, K. (1989). *Entwickeln von Instrumentarien zur rationellen Planung und Steuerung der Inbetriebnahme komplexer Produkte des Werkzeugmaschinenbaus* (RWTH Aachen, Hrsg.; Nr. H80). Dissertation. n.a. <http://publications.rwth-aachen.de/record/72249?ln=de>.
- (Spath & Landwehr, 2000) Spath, D. & Landwehr, R. (2000). 3-D Projektierung und Simulation von Ablaufsteuerungen. *WT Werkstatttechnik*, 90(7/8), 292–296.
- (Spitzweg, 2009) Spitzweg, M. (2009). *Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen* (Technische Universität München - Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik, Hrsg.; Nr. 233). Herbert Utz Verlag. <https://www.utzverlag.de/catalog/book/40931>.

- (Stark et al., 2017) Stark, R., Kind, S. & Neumeyer, S. (2017). Innovations in digital modelling for next generation manufacturing system design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 66, 169–172. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.045>.
- (Steegmüller & Zürrn, 2017) Steegmüller, D. & Zürrn, M. (2017). Wandlungsfähige Produktionssysteme für den Automobilbau der Zukunft. In *Handbuch Industrie 4.0 Bd.1* (2. Aufl., Bd. 1, S. 27–44). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-45279-0>.
- (Süß et al., 2015) Süß, S. (2015). Behaviour simulation for virtual commissioning using co-simulation. In A. Strahilov & C. Diedrich (Hrsg.), *Proceedings of the IEEE 20th Conference on Emerging Technologies & Factory Automation (ETFA)* (S. 1–8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2015.7301427>.
- (Süß et al., 2016a) Süß, S. (2016a). Standardized Classification and Interfaces of complex Behaviour Models in Virtual Commissioning. In D. Hauf, A. Strahilov & C. Diedrich (Hrsg.), *Proceedings of the Sixth International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV)* (52. Aufl., S. 24–29). Procedia Cirp. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.049>.
- (Süß et al., 2016b) Süß, S. (2016b). Test methodology for virtual commissioning based on behaviour simulation of production systems. In S. Magnus, M. Thron, H. Zipper, U. Odefy, V. Fäßler, A. Strahilov, A. Kłodowski, T. Bär & C. Diedrich (Hrsg.), *Proceedings of the 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)* (S. 1–9). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733624>.
- (Theiss, 2015) Theiss, S. (2015). *Echtzeitfähige Softwareagenten zur Realisierung cyber-physischer Produktionssysteme* (Technischen Universität Dresden - Fakultät Informatik, Hrsg.). Technischen Universität Dresden. Dissertation. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-211768>.
- (Toni & Tonchia, 1998) Toni, A. D. & Tonchia, S. (1998). Manufacturing flexibility: A literature review. *International Journal of Production Research*, 36(6), 1587–1617. <https://doi.org/10.1080/002075498193183>.

- (Törngren et al., 2017) Törngren, M., Asplund, F., Bensalem, S., McDermid, J., Passerone, R., Pfeifer, H. & Sangiovanni-Vincentelli, A. (2017). Characterization, Analysis and Recommendations for exploiting the Opportunities of Cyber-physical Systems. In B. Schätz, H. Song, D. Rawat, S. Jeschke & C. Brecher (Hrsg.), *Cyber-physical Systems - Foundations, Principles and Applications* (1. Aufl., S. 3–13). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-09461-7>.
- (Vater et al., 2020) Vater, J., Kirschning, M. & Knoll, A. (2020). Closing the loop: Real-time Error Detection and Correction in automotive production using Edge-/Cloud-Architecture and a CNN. In *Proceedings of the International Conference on Omni-layer Intelligent Systems (COINS)* (S. 1–7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COINS49042.2020.9191386>.
- (VDI 2206, 2004) VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (2004). *Entwicklungsmethodik für mechatronische Systeme*. VDI-Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2206.
- (VDI 2221-1, 1993) VDI-Fachbereich Management und Qualität (1993). *Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte*. VDI-Gesellschaft Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2221 Blatt 1.
- (VDI 2222-1, 1997) VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik (1997). *Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien*. VDI-Gesellschaft Produkt- und Prozessgestaltung (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2222 Blatt 1.
- (VDI 3633-1, 2014) VDI-Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb (2014). *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Begriffe*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 3633 Blatt 1.
- (VDI 4499-1, 2008) VDI-Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb (2008). *Digitale Fabrik - Grundlagen*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4499 Blatt 1.
- (VDI 4499-1, 2015) VDI-Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb (2015). *Digitale Fabrik - Grundlagen*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4499 Blatt 1.

- (VDI 4499-2, 2011) VDI-Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb (2011). *Digitale Fabrik – Digitaler Fabrikbetrieb*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4499 Blatt 1.
- (VDI 4800-1, 2016) VDI-Fachbereich Umwelttechnik (2016). *Ressourceneffizienz - Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien*. VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 4800 Blatt 1.
- (VDI 5200-1, 2011) VDI-Fachbereich Fabrikplanung und -betrieb (2011). *Fabrikplanung - Planungsvorgehen*. VDI-Gesellschaft Produktion und Logistik (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 5200 Blatt 1.
- (VDI/VDE 2182-1, 2011) VDI/VDE-Fachbereich Industrielle Informationstechnik (2011). *Informationssicherheit in der industriellen Automatisierung - Allgemeines Vorgehensmodell*. VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) VDI/VDE 2182 Blatt 1.
- (VDI/VDE 2206, 2020) VDI/VDE-Fachbereich Autonome Systeme & Mechatronik. (2020). *Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme (CPMS)*. (VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik, Hrsg.). Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) 2206. Beltz Verlag.
- (VDI/VDE 3693-1, 2015) VDI/VDE-Fachbereich Engineering und Betrieb automatisierter Anlagen (2015). *Virtuelle Inbetriebnahme – Modellarten und Glossar*. VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) VDI/VDE 3693 Blatt 1 im Entwurf.
- (VDI/VDE 3693-2, 2018) VDI/VDE-Fachbereich Engineering und Betrieb automatisierter Anlagen (2018). *Virtuelle Inbetriebnahme – Einführung der virtuellen Inbetriebnahme in Unternehmen*. VDI/VDE Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA) (Hrsg.), Richtlinie Verein Deutscher Ingenieure (VDI) VDI/VDE 3693 Blatt 2.
- (VDI/VDE-GMA, 2013) VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). (2013, April). *Cyber-Physical Systems: Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation* (K. D. Bettenhausen & S. Kowalewski, Hrsg.; Nr. 2013-03). <https://www.vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen/details/cyber-physical-systems-chancen-und-nutzen-aus-sicht-der-automation>.

- (VDI-EFRA et al., 1990) VDI-EFRA, Breitmeier, H.-W., Bolkart, D., Esser, H., Fiegert, A., Gäbler, H.-D., Gentzcke, J., Gohritz, A., Jatho, H.-D., Kettner, P., Koerth, D., Pochwalla, A., Reinhardt, K.-D. & Sossenheimer, K.-H. (1990). *Inbetriebnahme komplexer Maschinen und Anlagen* (VDI-Gesellschaft Produktionstechnik & W. Eversheim, Hrsg.; 1. Aufl.). VDI-Verlag.
- (Virtuelle Inbetriebnahme, o. D.) *Virtuelle Inbetriebnahme*. (o. D.). ISG Virtuos. Abgerufen am 24. November 2020, von <https://www.isg-stuttgart.de/de/isg-virtuos/virtuelle-inbetriebnahme.html>.
- (Vogel-Heuser et al., 2020) Vogel-Heuser, B., Böhm, M., Brodeck, F., Kugler, K., Maasen, S., Pantförder, D., Zou, M., Buchholz, J., Bauer, H., Brandl, F. & Lindemann, U. (2020). Interdisciplinary engineering of cyber-physical production systems: highlighting the benefits of a combined interdisciplinary modelling approach on the basis of an industrial case. In *Design Research in Industry* (6. Aufl., Bd. E5, S. 1–36). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/dsj.2020.2>.
- (Voigt et al., 2018) Voigt, K. I., Günther, E. & Szczutkowski, A. (2018). *Ressource*. Gabler Wirtschaftslexikon. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/ressource-42805>.
- (von Pieverling, 2002) von Pieverling, J. (2002). *Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling* (Technischen Universität München - Fakultät für Maschinenwesen, M. F. Zäh & G. Reinhart, Hrsg.; Nr. 178). Dissertation. Herbert Utz Verlag. <https://www.utzverlag.de/catalog/book/40230>.
- (Vorkurka & O'Leary-Kelly, 2000) Vokurka, R. J. & O'Leary-Kelly, S. W. (2000). A review of empirical research on manufacturing flexibility. *Journal of Operations Management*, 18, 485–501. [https://doi.org/10.1016/S0272-6963\(00\)00031-0](https://doi.org/10.1016/S0272-6963(00)00031-0).
- (Wattenberg et al., 2020) Wattenberg, K., Schneider, S., Hoefer, M. & Papsch, T. (2020). Eine innovative Karosseriefertigung für ein innovatives Produkt - Standardisierte und Hochflexible Rohbauanlagen. *ATZ extra - Die neue S-Klasse von Mercedes Benz*, Dezember 2020, 158–165. <https://www.springerprofessional.de/eine-innovative-karosseriefertigung-fuer-ein-innovatives-produkt/18714794>.
- (Weber, 2006) Weber, K. H. (2006). *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen* (3. Aufl.). Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/3-540-34317-2>.

- (Weber, 2019) Weber, K. H. (2019). *Inbetriebnahme verfahrenstechnischer Anlagen: Praxishandbuch mit Checklisten und Beispielen (VDI-Buch) (German Edition)* (5. Aufl. 2019 Aufl.). Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48162-2>.
- (Weck, 2001) Weck, M. (2001). *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme: Automatisierung von Maschinen und Anlagen (VDI-Buch)* (5. Aufl.). Springer.
- (Wenzel et al., 2007) Wenzel, S., Weiß, M., Collisi-Böhmer, S., Pitsch, H. & Rose, O. (2007). *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien (VDI-Buch) (German Edition)* (2008. Aufl.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-35276-1>.
- (Werner, 1996) Werner, O. (1996). *Zur Definition, Identifikation und Analyse von Prozeßsystemen* (German Edition). Diplomarbeiten Agentur diplom.de.
- (Westkämper, 2003) Westkämper, E. (2003). Wandlungsfähige Organisation und Fertigung in dynamischen Umfeldern. In H.-J. Bullinger, H. J. Warnecke & E. Westkämper (Hrsg.), *Neue Organisationsformen im Unternehmen - Ein Handbuch für das moderne Management* (2. Aufl., S. E1–E15). Springer.
- (Westkämper & Löffler, 2016) Westkämper, E. & Löffler, C. (2016). *Strategien der Produktion*. Springer Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-48914-7>.
- (Weyer et al., 2016) Weyer, S., Meyer, T., Ohmer, M., Gorecky, D. & Zühlke, D. (2016). Future Modeling and Simulation of CPS-based Factories: an Example from the Automotive Industry. In M. Tsuzuki (Hrsg.), *12th IFAC Workshop on Intelligent Manufacturing Systems IMS 2016* (49. Aufl., Bd. 31, S. 97–102). IFAC-PapersOnLine. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.12.168>.
- (Wiendahl, 2002a) Wiendahl, H. P. (2002). Wandlungsfähigkeit — Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. *wt Werkstattstechnik online*, 92(4), 122–127. https://www.researchgate.net/publication/281306830_Wandlungsfähigkeit.
- (Wiendahl, 2002b) Wiendahl, H. H. (2002). *Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld*. Jost-Jetter.
- (Wiendahl et al., 2007) Wiendahl, H. P., ElMaraghy, H. A., Nyhuis, P. & Zäh, M. F. (2007). Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. In *Proceedings of the 56th CIRP ANNALS Manufacturing Technology* (56. Aufl., Bd. 2, S. 783–809). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.003>.

- (Winko, 2000) Winko, S. (2000). Methode. In G. Braungart, K. Grubmüller, J.-D. Müller, F. Vollhardt & K. Weimar (Hrsg.), *Reallexikon der deutschen Literaturwissenschaft. Neubearbeitung des Reallexikons der deutschen Literaturgeschichte*. (Bd. 2, S. 581–585). De Gruyter.
- (Wocker et al., 2020) Wocker, M., Betz, N. K., Feuersänger, C., Lindworsky, A. & Deuse, J. (2020). Unsupervised Learning for Opportunistic Maintenance Optimization in Flexible Manufacturing Systems. In *Proceedings of the 53rd Conference on Manufacturing Systems* (93. Aufl., S. 1025–1030). Procedia CIRP. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.04.025>.
- (Wünsch, 2006) Wünsch, G. (2006). Wann lohnt sich eine Virtuelle Inbetriebnahme? In M. Zäh & G. Reinhart (Hrsg.), *Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?* (S. 1-1 bis 1-17). Technische Universität München - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwb.
- (Wünsch, 2008) Wünsch, G. (2008). *Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme* (Technische Universität München - Fakultät für Maschinenwesen, Hrsg.; Nr. 215). Herbert Utz Verlag. <https://www.utzverlag.de/assets/pdf/40795les.pdf>.
- (Zäh et al., 2004) Zäh, M., Vogl, W., Wünsch, G. et al. (2004). Virtuelle Inbetriebnahme im Regelkreis des Fabriklebenszyklus'. In M. Zäh & G. Reinhart (Hrsg.), *Virtuelle Produktionsplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik* (Bd. 74, S. 1-1 bis 1-21). Technische Universität München - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, iwb.
- (Zäh et al., 2005) Zäh, M. F., Möller, N. & Vogl., W. (2005). Symbiosis of Changeable and Virtual Production – The Emperor's New Clothes or Key Factor for Future Success? In G. Reinhart & M. Zäh (Hrsg.), *Proceedings of the 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production* (S. 1). Utz.
- (Zäh et al., 2006) Zäh, M. F., Wünsch, G., Hensel, T. & Lindworsky, A. (2006). Nutzen der virtuellen Inbetriebnahme: Ein Experiment. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 101(10), 595–599. <https://doi.org/10.3139/104.101070>.

- (Zeman et al., 2016) Zeman, K., Pumhössel, T., Reisinger, J., Winter, G. & Kainz, A. (2016). Modellbildung und Simulation – eine permanente Herausforderung auf dem Weg zur cyber-physischen Produktion. In Johannes-Kepler-Universität Linz - Institut für Mechatronische Produktentwicklung und Fertigung (Hrsg.), *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte: Bd. 161 (11)* (S. 532–538). Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/s00501-016-0549-4>.
- (Zeugträger, 1998) Zeugträger, K. (1998). *Anlaufmanagement für Großanlagen: Bd. Fortschritte Berichte VDI Reihe 2, Fertigungstechnik 470*. Beltz Verlag.

VI. Anhang 5.1

Literaturdaten									
Literaturdatenbanken & Suchmaschinen									
No.	Google Scholar	Research Gate	IEEE	Web of Science Direct	1st Author	2nd A.	3rd A.	Titel	
1	1	IEEE051		1	Afanashev	Fedorov	Andreev	A Concept for Integration of Voice Assistant and Modular Cyber-Physical Production System	2019
2	2	GS069	IEEE075	2	Afanashev	Krylova	Shorokho	A Design of Cyber-Physical Production System Prototype Based on an Ethereum Private Network	2018
3	3	GS051	IEEE099	2	Afanashev	Fedorov	Krylova	An application of blockchain and smart contracts for machine-to-machine communications in cyber-physical production systems	2018
4	4	GS080	2	Ait-Alia	Kreuzt	Rippl		Simulation-based analysis of the interaction of a physical and a digital twin in a cyber-physical production system	2019
5	5	RG012		1	Al-Fedhly	Elmaraghy	-	Design Methodology Framework for Cyber-Physical Products	2020
6	6	WS021	1	Alguliyev	Imamverdiyev	Sukhostatov		Hybrid DeepGCModel for cyber-attacks detection on cyber-physical systems	2021
7	7	WS056	1	Alves	Putnik	-		Cyber-Physical Production System (CPPS) Decision Making Duration/Time Impact on Manufacturing System Performance	2019
8	8	RG028	WS033	2	Andreev	Charuszkayakryzhanov		Application of intelligent engineering in the planning of cyber-physical production systems	2021
9	9	WS047	1	Andronie	La zaroni	Iatagan		Sustainable Cyber-Physical Production Systems in Big Data-Driven Smart Urban Economy/A Systematic Literature Review	2021
10	10	RG032		1	Anis	Niggemann	Schäfer	CPPLA: Cyber-Physical Production Planning La nage	2015
11		SD0092	1	Ansari	Hold	Khobreh		A knowledge-based approach for representing (object) profile toward optimal human-machine collaboration in cyber physical production systems	2020
12		SD0044	1	Ansari	Nixdorf	Sihm		Insurability of Cyber Physical Production Systems: How Does Digital Twin Improve Predictability of Failure Risk?	2020
13	13	GS023	SD0098	2	Ansari	-		Knowledge management 4.0: theoretical and practical considerations in cyber physical production systems	2019
14	14	GS018	WS097	2	Ansari	Glarwar	Nemeth	PrIMA: a prescriptive maintenance model for cyber-physical production systems	2019
15	15	IEEE030		1	Antkowiak	Luettkie	Langer	Insurability of Cyber Physical Production Systems: A Teaching Concept in Engineering Education	2017
16	16	IEEE007		1	Astarloa	Moreira	Bidarte	FPCA based nodes for sub-microsecond synchronization of cyber-physical production systems on high availability networks	2015
17	17	IEEE031	1	Bakakeu	Fuchs	Javied		Multidisciplinary Design Space Exploration for the Integration of Advanced Analytics in Cyber-Physical Production Systems	2018
18		WS057	1	Bampoula	Staterlis	Nikolaakis		A Deep Learning Model for Predictive Maintenance in Cyber-Physical Production Systems Using LSTM Autoencoders	2021
19		IEEE023	1	Bathla	-	-		Info-Chunk Driven RPLP Structure Based Product Model for Multidisciplinary Cyber Physical Systems	2018
20	20	RG074		1	Bayanifar	Kühlne	-	Enhancing Dependability and Security of Cyber-Physical Production Systems	2017
21		WS005	1	Bayhan	Meissner	Kaisser		Presentation of a novel real-time production supervision concept with cyber-physical systems and efficiency validation by process status indicators	2020
22	22	GS028	SD079	2	Becker	Stern	-	Future trends in human work area design for cyber-physical production systems	2016
23	23	GS052	RG053	3	Berggi	Pedone	Mézgár	A novel fluid architecture for cyber-physical production systems	2019
24		WS035		1	Berggi	Pedone		Towards trustworthy Cyber-Physical Production Systems: A dynamic agent accountability approach	2021
25	25	GS002	SD043	2	Berger	Zipfeli	Braunauer	Approach for an event-driven production control for cyber-physical production systems	2019
26		WS055	1	Berger	Hackel	Hafner		Organizing Self-Organizing Systems: A Terminology, Taxonomy, and Reference Model for Entities in Cyber-Physical Production Systems	2021
27		SD060	1	Biesinger	Meike	Kraß		A digital twin for physical planning based on cyber-physical systems: A Case Study for a Cyber-Physical Production System	2019

Charakteristiken Cyber-physischer Produktionsysteme									
Literaturdaten									
No.	Google Scholar	Research Gate	IEEE	Web of Science	ScienceDirect	1st Author	2nd A.	3rd A.	Titel
56				WS025	1	Désmit	Ehabashy	Wells	An approach to cyber-physical vulnerability assessment for intelligent manufacturing systems.
57	RG098		VWS069	2	Dhiman	Röcker	-		Middleware for providing activity-driven assistance in cyber-physical production systems.
58	GS027		WS023	2	Ding	Chan	Zhang		Defining a digital twin-based cyber-physical production system for autonomous manufacturing in smartshop floors.
59			WS027	1	Ding	Jiang	-		Incorporating social sensors, cyber-physical system nodes, and smart products for personalized production in a social smart manufacturing environment
60			WS022	1	Dmvriv	Hordijk			ADAPTIVE CYBER-PHYSICAL SYSTEMS OF THE MILK PRODUCTION PROCESS
61			IEEE006	1	Eckhart	Eckhart			Enhancing Cyber Situational Awareness for Cyber-Physical Systems through Digital Twins
62			IEEE048		2	Eckhart	Lüder		Security Development Lifecycle for Cyber-Physical Production Systems
63			SD033	1	Erhardt	Hoffmann	-		2017
64			WS002	1	Ehabashy	Wells	Camillo		The Digital Shadow: Developing a universal model for the automated optimization of cyber-physical production systems based on real-time data.
65			WS070	1	Ehabashy	Dastoorian	Wells		A cyber-physical attack taxonomy for production systems: a quality control perspective
66			RG039		1	Emec	Selliger	-	Random sampling strategies for multivariate statistical process control to detect cyber-physical manufacturing attacks.
67			IEEE046	WS088	2	Engel	Greiner	Seifert	Architecture of Cyber Physical Production System in Manufacturing
68			IEEE088		1	Engelsberger	Greiner	-	Ontology-Assisted Engineering of Cyber-Physical Production Systems in the Field of Process Technology.
69			SD040		1	Faller	Höftmann	-	Dynamic management of cloud- and fog-based resources for cyber-physical production systems with a realistic validation architecture and results.
70			SD023	1	Fink	Sochor			Service-oriented communication model for cyber-physical-production-systems
71			IEEE072		1	Fleischmann	Kohli		Dynamic Value Stream Optimization for Manual Assembly in the Learning Factory for Cyber-Physical Production Systems.
72			SD094	2	Francalanza	Borg	Constantin		A reference architecture for the development of socio-cyber-physical condition monitoring.
73			SD045	2	Francalanza	Mericaea	Fenzl		2016
74			SD099	2	Frazzon	Hartmann	Matuschke		Dynamic Value Stream Optimization for designing cyber physical production systems
75			SD004	2	Friedrich	Lazarcova-Mc			Towards Socio-Cyber-Physical Systems in Production Networks
76			IEEE014		1	Frolov	Krainev		Towards Data-Driven Reliability Modeling for Cyber-Physical Production Systems
77			SD061	1	Galaske	Anderl			Cyber-Physical Machining Systems Based on Commercial CNC Equipment
78			RG031		1	Galaske	Strong	Andrei	Distillation Management for Resilient Processes in Cyber-Physical Production Systems
79			IEEE017		1	Gao	Peng		Process Deviations in Cyber-Physical Production Systems
80			GS096		1	Garcia	Lanas	Jia	2015
81			VWS094	1	Garcia	Perez	Edison		Cyber-Physical Systems Tested Based on Cloud Computing and Software Defined Network
82			SD022	2	Garcia	Montalvo-Lo	Alegria		An approach of cyber-physical production systems architecture for robot control
83			SD035	2	Glatt	Garcia	Alegria		2018
84			RG017		1	Glatt	Aurich		Cyber-Physical Labs to enhance engineering training and education
85			SD052	1	Glatt	Kull	Ravani		2020
									Physical modeling of material flows in cyber-physical production systems
									Physical simulation of cyber-physical production systems
									Validation of a physics engine for the simulation of material flows in cyber-physical production systems

Literaturdatenbanken & Suchmaschinen										Charakteristiken Cyber-physischer Produktionsysteme									
No.	Google Scholar	IEEE Research Gate	Web of Science	Science Direct	1st Author	2nd A.	3rd A.	Title	Jahr					Identifizierter C-					
172	GS088				1 Menges	-	-	The new cyber-physical making in architecture Computational construction	2015					Wandlungsfähigkeit					
173					SD016	1 Mennenga	Rogall	Yang	2020					Modularität					
174		IEEE089			1 Merkel	Berger	Schultz	Architecture and development approach for integrated cyber-physical production systems (CPPS)	2017					Robustheit					
175		IEEE024			1 Merkel	Atug	Berger	Mass Customization and Paperless Assembly in the Learning Factory for Cyber-Physical Production Systems: Learning Module 'From Paperbased to Paperless Assembly'	2018					Skalierbarkeit					
176					SD074	1 Merkel	Atug	Merhar	2017					Neutrailität					
177	GS083				SD049	2 Miranda	Pérez-Rodríguez	Borja	2017					Modularität					
178			WS080		1 Madineo	Vera	Gjelum	Gjelum	2017					Robustheit					
179	GS029		WS010		2 Monostori	-	-	Cyber-physical production systems:: roots from manufacturing science and technology	2015					Modularität					
180	GS006		SD089	2 Monostori	-	-	-	Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges	2014					Desensibilisierung					
181	GS068		WS016	2 Monostori	Kadar	Bauerhain	Cyber-physical systems in manufacturing		2016					Flexibilität					
182		RG063			1 Moraes	Lepikson	-	CPM: A Logical Architecture for the Cyber-Physical Production Model	2017					Modularität					
183		IEEE008			1 Nordinyi	Bliffi	-	Versioning in Cyber-physical Production System Engineering -- Best-Practice and Research Agenda	2015					Modularität					
184			WS059	SD070	2 Mört	Emmanouilidis	Hafner	Cyber-physical systems for performance monitoring in production intralogistics	2020					Modularität					
185			SD024	1 Motsch	David	Sivalingam	Approach for Dynamic Price-Based Demand Side Management in Cyber-Physical Production Systems	2020					Modularität						
186			WS065	1 Müller	Kessler	Humphrey	Data in Context: How Digital Transformation Can Support Human Reasoning in Cyber-Physical Production Systems	2021					Modularität						
187		RG077		SD001	2 Müller	Jazdi	Schmidt	Cyber-physical production systems: enhancement with a self-organized reconfiguration management	2021					Modularität					
188	GS099				1 Müller	Walth	Jazdi	Identification of Reconfiguration Demand and Generation of Alternative Configurations	2021					Modularität					
189		IEEE060			1 Musil	Bliffi	-	Towards collective intelligence system architectures for supporting multi-disciplinary engineering of cyber-physical production systems	2016					Modularität					
190		WS071	1 Navickas	Kuznetsova	Gruzauskaitė	Pierce		CYBER-PHYSICAL SYSTEMS EXPRESSION IN INDUSTRY 4.0 CONTEXT	2017					Modularität					
191	GS065		WS044	2 Neghina	Zamfirescu			Early-stage analysis of cyber-physical production systems through collaborative modelling	2020					Modularität					
192	GS059			1 Niemann	Frey	-		Data-driven anomaly detection in cyber-physical production systems	2015					Modularität					
193	GS007			1 Niemann	Lohweg	-		On the diagnosis of cyber-physical production systems	2015					Modularität					
194		WS013	SD019	2 Nikolakis	Senington	Sipsas		On a containerized approach for the dynamic planning and control of a cyber-physical production system	2020					Modularität					
195		RG044			1 Nogueira	Reis	Pinto	Self-adaptive Cobots in Cyber-Physical Production Systems	2019					Modularität					
196		WS068	1 Nota	Matonti	Bisogno			The contribution of cyber-physical production systems to activity-based costing in manufacturing	2020					Modularität					
197	GS091		WS032	2 Nouri	Trentaux	Bekrar		Towards energy efficient scheduling of manufacturing systems through collaboration between cyber-physical production and energy systems	2019					Modularität					

Literaturdaten										Charakteristiken Cyber-physischer Produktionsysteme	
No.	Google Scholar	Research Gate	IEEE	Web of Science	ScienceDirect	1st Author	2nd A..	3rd A..	Title	Jahr	
198	IEE096			WS061	1	Omar	Imen	M'hamed	Deployment of Fog Computing Platform for Cyber Physical Production System Based on Docker Technology	2019	
199				IEE079	2	Ortiz	Alimenti	Rimand	Modeling and Specifying Requirements for Cyber-Physical Systems	2013	
200				WS015	2	Otto	Vogel-Hütsch	Niggemann	Automatic Parameter Estimation for Reusable Software Components of Modular and Reconfigurable Cyber-Physical Production Systems in the Domain of Discrete Manufacturing	2018	
201				SD072	1	Otto	Henning	Niggemann	Why Cyber-physical Production Systems Need a Descriptive Engineering Approach—A Case Study in Print & Produce	2014	
202				IEE085		1	Pa caux-Lemoine	Berdal I	Towards human-based industrial cyber-physical systems	2018	
203				RG026		1	Paredes	Moreno	Human Fatigue Aware Cyber-Physical Production System	2020	
204				GS092		2	Park	Easwaran	Challenges in digital twin development for cyber-physical production systems	2018	
205				WS012	1	Park	Lee	Kim	Digital twin-based cyber physical production system architectural framework for personalized production	2020	
206				WS077	1	Park	Son	Noh	The architectural framework of a cyber physical logistics system for digital-twin-based supply chain control	2020	
207				RG083		1	Park	Easwaran	TiLA: Twin-in-the-loop Architecture for Cyber-Physical Production Systems	2020	
208				RG004		1	Paul Wright	-	Cyber-physical product manufacturing	2014	
209						SD073	1	Pechmann	Using a semi-automated job-shop production system model to prepare students for the challenges of industrial Cyber-Physical Systems	2019	
210						SD018	3	Pengcheng Yang	Data analytics enables production visibility for Cyber-Physical Production Systems	2020	
211				IEE093		1	Perumala	Yoginath Lopez	Detecting Sensors and Inferring their Relations at Level 0 in Industrial Cyber-Physical Systems	2019	
212				IEE015		1	Pinkovich	Platunov	Model-driven functional testing of cyber-physical systems using deterministic replay techniques	2018	
213				RG050		1	Pinto	Gonçalves	CPDS 101 - A tutorial introduction on Cyber-Physical Production Systems	2021	
214				WS020	3	Pintzoni	Albe Orlandelli	A framework for operative and social sustainability functionalities in Human-Centric Cyber-Physical Production Systems	2020		
215				WS079	1	Pirvu	Zamfirescu	Gorecky	Engineering insights from an anthropocentric cyber-physical system: A case study for an assembly station	2016	
216				WS074	1	Post	Ilsen	Hannan	User-Guided Visual Analysis of Cyber-Physical Production Systems	2017	
217				GS054		1	Powell	Romero	Towards digital lean cyber-physical production systems: Industry 4.0 technologies as enablers of leaner production	2018	
218				RG099		SD006	2	Rabiser	Zottl	Towards Mastering Variability in Software-Intensive Cyber-Physical Production Systems	2021
219				IEE028		1	Rana	Dahotre	-	IoT-Based Cyber-Physical Additive Manufacturing Systems: A Secure Communication Architecture, Research Challenges and Directions	2021
220						SD065	1	Regal	Pereira	Towards a conceptual model of structural and behavioral elements in cyber-physical production systems	2019
221						WS091	1	Regan	McCaffery	Quality improvement mechanism for cyber physical systems-An evaluation	2020
222				GS072		1	Reis	Pinto	Gonçalves	Human-centered application using cyber-physical production system	2017
223				WS018	1	Rho	Vasilicos	Chen	Cyber physical systems technologies and applications	2016	
224				RG027	2	Ribeiro	-	-	Cyber-physical production systems' design challenges	2017	

Charakteristiken Cyber-physischer Produktionsysteme									
Literaturdatenbanken & Suchmaschinen									
No.	Google Scholar	Research Gate	IEEE	Web of Science	Science Direct	1st Author	2nd A.	3rd A.	Titel
225	GS043				1 Ribeiro	Hochwallner	-	-	On the design complexity of cyber-physical production systems
226		IEEE081			1 Ribeiro	Hochwallner	-	-	Time-related Constraints in Administration Shell Design within Cyber-Physical Production Systems
227	GS040	IEEE004	WS026		3 Ribeiro	Björkman	-	-	Transitioning from standard automation solutions to cyber-physical production systems: an assessment of critical conceptual and technical challenges
228		IEEE074			1 Rocha	Tripa	Aleixo	-	Agent-based Plug and Produce Cyber-Physical Production System - Test Case
229		RG066			1 Rogalla	Niggemann	-	-	Automated process planning for cyber-physical production systems
230		IEEE016			1 Rogozinsky	Sotnikov	-	-	Principles of cyber-physical models mapping onto sonification sound spaces
231	GS032			SD085	2 Rojas	Rauch	Vidoni	-	Enabling connectivity of cyber-physical production systems: a conceptual framework
232		IEEE007			1 Ruan	Yu	Yang	-	Design and Realize of Tire Production Process Monitoring System Based on Cyber-Physical Systems
233	GS082				1 Rubio	Dionisio	Torres	-	Industrial IoT Devices and cyber-physical production systems: Review and use case
234	GS014			SD095	2 Rudtsch	Gausemeier	Gesing	-	Pattern-based business model development for cyber-physical production systems
235		IEEE082			1 Sacala	Dumitruache	Moisescu	-	Agricultural enterprise architecture based on cyber physical systems paradigm
236		IEEE057			1 Sahnoun	Xu	Beiagacem	-	Fractional modelling of cyber physical production system using multi-agent systems
237	GS055				1 Salazar	Ryashentsev	Lüder	-	Cyber-physical production systems architecture based on multi-agent's design pattern—comparison of selected approaches based on four agent patterns
238		IEEE035		SD053	1 Salunkhe	Gopalakrishn	Skogoh	-	Cyber-Physical Production Testbed: Literature Review and Concept Development
239	GS049	RG061		SD056	3 Samir	Khabbazi	Maifei	-	Key Performance Indicators in Cyber-Physical Production Systems
240		IEEE009			1 Schätz	-	-	-	Platforms for Cyber-Physical Systems – fractal operating system and integrated development environment for the physical world
241	GS066	IEEE035			2 Schlick	-	-	-	Cyber-physical systems in factory automation – towards the 4th industrial revolution
242		IEEE013			1 Schmittner	Ma	Ruprecht	-	Practical safe, secure and reliable machine-to-machine connectivity for cyber-physical-production systems
243		RG097		SD0096	2 Schreiber	Klüber-Koch	Richter	-	Integrated Production and Maintenance Planning for Cyber-Physical Production Systems
244	GS047	RG081		SD039	3 Schreiber	Vernickel	Richter	-	Integrated production and maintenance planning in cyber-physical production systems
245		RG035		SD093	2 Schuh	Potente	Thomas	-	Short-term Cyber-Physical Production Management
246	GS050			SD075	2 Schuhmacher	Hummel	-	Decentralized control of logistic processes in cyber-physical production systems at the example of ESB logistics learning factory	
247	GS021			SD071	2 Seitz	Nyhuis	-	Cyber-physical production systems combined with logistic models—a learning factory concept for an improved production planning and control	
248	GS062	IEEE025		Settanni	2 Skopik	Putnik	-	Protecting cyber physical production systems using anomaly detection to enable self-adaptation	
249			WS090	1 Shah	-	-	-	-	Machining Learning Based Manufacturing Control System for Intelligent Cyber-Physical Systems
250		IEEE086		1 Shahriar	Sunny	Liu	MITComm	-	Virtualization and Integration of Physical Machine Operations with Digital Twins in Cyber-Physical Manufacturing Cloud
251		RG001		1 Shukalov	Zharinov	Zharinov	Neto	-	Cyber-physical production information environment
252		IEEE049		1 Silva	Reis	-	-	-	Universal dataser for wireless sensor networks in industrial cyber physical production systems

Charakteristiken Cyber-physischer Produktionsysteme									
Literaturdatenbanken & Suchmaschinen									
No.	Google Scholar	Research Gate	IEEE	Web of Science	Science Direct	1st Author	2nd A.	3rd A.	Titel
G0023	IEEE073			1 Skarlat	Borkowski	Schulte	Towards a methodology and instrumentation toolset for cloud manufacturing.		2016
G0024	W0028			1 Son	Park	Lee	Digital twin-based cyber-physical system for automotive body production lines.		2021
G0025	IEEE029			1 Sonthisted	Koopiruk	Songkasisin	Prediction of Production Performance for Tapioca Industry using LSTM neural network		2019
G0026	IEEE001			1 Sriyakul	Koopiruk	Songkasisin	Cyber-Physical System Based Production Monitoring for Tapioca Starch Production		2017
G0027	WS062			2 Stern	Becker	-	Concept and evaluation of a method for the integration of human factors into human-oriented work design in cyber-physical production systems.		2019
G0028	SD050			2 Stern	Becker	-	Development of a model for the integration of human factors in cyber-physical production systems.		2017
G0029	RG003			1 Stich	Hering	Meissner	Cyber Physical Production Control		2015
G0030	IEEE084			1 Stifter	Eckhart	Brenner	Avoiding Risky Designs When Using Blockchain Technologies in Cyber-Physical Systems		2019
G0031	RG009			SD026	2 Stock	Schel	-	Cyber-Physical Production System Self-Escription-Based Data Access Layer	
G0032	IEEE037			1 Stock	Schel	Bauerhansl	Cyber-Physical Production System Modeling for Operators		2019
G0033	RG087			SD012	2 Stock	Schel	BAUERHANSL e-based Cyber-Physical Production System Modeling for Operators		2020
G0034	GS089			1 Strang	Galaske	Anderl	Dynamic, adaptive worker allocation for the integration of human factors in cyber-physical production systems.		2016
G0035	GS098			2 Strohschein	Bunte	Fischbach	Cognitive capabilities for the CAA in cyber-physical production systems		2021
G0036	WG036			3 Talkestaní	Jung	Lindemann	An architecture of an intelligent digital twin in a cyber-physical production system		2019
G0037	RG017			SD090	1 Tantik	Anderl	-	Industrie 4.0: Using Cyber-Physical Systems for Value-a-Team Based Production Evaluation	
G0038	IEEE068			1 Taylor	Sharif	-	Security challenges and methods for protecting critical infrastructure cyber-physical systems		2017
G0039	RG008			2 Thiede	-	-	Cyber-Physical Production Systems (CPBS)-Introduction		2021
G0040	GS008			SD032	3 Thiede	-	Environmental Sustainability of Cyber Physical Production Systems		2018
G0041	RG025			SD059	3 Thiede	Herrmann	Implementing Cyber-Physical Production Systems in Learning Factories		2016
G0042	GS009			SD063	4 Tomiyama	Moyen	-	Resilient architecture for cyber-physical production systems	
G0043	RG023			SD100	1 Tonelli	Demartini	Cyber-physical systems (CPS) in supply chain management from foundations to practical implementation		2018
G0044	IEE062			1 Traganos	Vanderfeesten-Grefen	Steinhilper	End-to-End Production Process Orchestration for Smart Printing Factories: An Application in Industry		2021
G0045	IEEE005			1 Tritschkov	Goetz	-	Verification and Validation of Decentralized Self-Organizing Cyber-Physical Production Systems: A Blueprint Process for Testing Cyber-Physical Production Systems with Self-Properties		2016
G0046	GG005			SD081	2 Uhlemann	Lehmann	The digital twin: Realizing the cyber-physical production system for Industry 4.0		2017
G0047	IEE038			2 Ullrich	Voyatzis	Weippl	Secure cyber-physical production systems - Solid steps towards realization		2016
G0048	GG005			1 Urbina	Asztialoa	Laizaro	Cyber-physical production system gateway based on a programmable SoC platform		2017
G0049	IEE027			1 Verl	Lechner	Schlechter	Globalized cyber-physical production systems		2012
G0050	RG015			1 Villalonga	Negrí	Biscarro	A decision-making framework for dynamic scheduling of cyber-physical production systems based on digital twins		2021

Charakteristiken Cyber-physischer Produktionsysteme									
Literaturdatenbanken & Suchmaschinen					Literaturdaten				
No.	Google Scholar	Research Gate	IEEE	Web of Science Direct	1st Author	2nd A.	3rd A.	Title	Jahr
281	GS063		WS083	2 Vogel-Heuser	Trunzer	Hujo		<u>Deployment of Smart Algorithms in Cyber-Physical Production Systems Using DS/PhNCs</u>	2021
282	GS013	RG033	WS003	3 Vogel-Heuser	Lee	Leitão		<u>Agents enabling cyber-physical production systems</u>	2015
283	GS012	IEEE034		2 Vogel-Heuser	Diedrich	Pantföld		<u>Coupling heterogeneous production systems by a multi-agent based cyber-physical production system</u>	2014
284	IEEE032			1 Vogel-Heuser	Prieler	-		<u>Evaluation of selected metrics for flexibility of Cyber Physical Production Systems</u>	2017
285	GS071			1 Vogel-Heuser	Böhm	Brodeck		<u>Interdisciplinary engineering of cyber-physical production systems; highlighting the benefits of a combined interdisciplinary modelling approach on the basis of an industrial case</u>	2020
286		IEEE098		1 Vogel-Heuser	-	-		<u>Plenary Lecture 1: Cyber physical production systems/Industry 4.0-challenges in research and industrial application</u>	2015
287		WS054		1 Vogel-Heuser	Wildermann Teich			<u>Towards the co-evolution of industrial products and its production systems by combining models from development and hardware/software deployment in cyber-physical systems</u>	2017
288			SD047	1 von Biggelen	Buratti	Mager		<u>Self-Organizing Maps for Anomaly localization and Predictive Maintenance in Cyber-Physical Production Systems</u>	2018
289	RG058			1 Wan	Wang	Xue		<u>An integrated Design Method For Cyber-Physical Production Systems</u>	2018
290	GS026			1 Wang	Kemény	Várncsa		<u>Human-robot collaborative assembly in cyber-physical production: Classification framework and implementation</u>	2017
291	IEEE018			1 Wang	Guo	Cheng		<u>Research on Safety and Reliability of intelligent oilfield monitoring system based on Cyber-Physical System</u>	2021
292		SD088	1 Watanabe	da Silva	Tsuzuki			<u>Assessment of Sustainability for Production Control Based on Petri net and Cyber-Physical Cloud System</u>	2017
293	IEEE067			1 Weippl	Kieseberg	-		<u>Security in cyber-physical production systems: A roadmap to improving IT-security in the production system lifecycle</u>	2017
294	RG067			1 Weyrich	Klein	Schmidt		<u>Evaluation Model for Assessment of Cyber-Physical Production Systems</u>	2017
295	RG010			1 Weyrich	-	-		<u>On the application of cyber physical production systems</u>	2018
296		WS014	1 Wu	Geopp	Siadat			<u>Concept and engineering of cyber physical production systems: a systematic literature review</u>	2020
297	RG089	IEEE055	2 Wu	Geopp	Siadat			<u>Cyber Physical Production Systems: A Review of Design and Implementation Approaches</u>	2019
298		WS093	1 Xia	Xi	-			<u>Manufacturing paradigm-oriented PHM methodologies for cyber-physical systems</u>	2019
299	IEEE100		1 Yang	Zhou	Yang			<u>Anomaly detection Based on Zone Partition for Security Protection of Industrial Cyber-Physical Systems</u>	2018
300		IEEE083	1 Yang	Lin	-			<u>Development of A Predictive Maintenance Platform for Cyber-Physical Systems</u>	2019
301		SD076	1 Yang	Boev	Haefner			<u>Method for developing an implementation strategy of cyber-physical production systems for small and medium-sized enterprises in China</u>	2018
302	IEEE061		1 Yang	Jiang	-			<u>Web-based Machine Learning Modeling in a Cyber-Physical System Construction Assistant</u>	2019
303	IEEE021		1 Yetis	Karakose	-			<u>Image processing based anomaly detection approach for synchronous movements in cyber-physical systems</u>	2018
304		WS092	1 Yin	Ming	Zhang			<u>Understanding Data-Driven Cyber-Physical-Social System (D-CPSS) Using a 7C Framework in Social Manufacturing Context</u>	2020
305	IEEE092		1 Yu	Sun	Zheng			<u>Smart Factory Production and Operation Management Methods based on HCPS</u>	2020

Literaturdatenbanken & Suchmaschinen										Literatardaten										
No.	Google Scholar	Research Gate	IEEE	Web of Science	Science Direct	1st Author	2nd A.	3rd A.	Title	Year	Charakteristiken Cyber-physischer Produktionsysteme	Modularität	Robustheit	Neutralität	Skalierbarkeit	Universität	Veränderungsfähigkeit	Wandlungsfähigkeit	Identifizierter C.	
306		IEEE077			1 Yu	Zhou	Ma		Trustworthiness Modeling and Analysis of Cyber-physical Manufacturing Systems.	2017	• Adaptivität	•	•	•	•	•	•	•	6	
307	RG034				1 Zakoldiev	Gurjanov	Shukalov	[Functional safety of cyber-physical production of the Industry 4.0.		2020	• Agilität	•	•	•	•	•	•	•	0	
308	RG036				1 Zakoldiev	Shukalov	Zharinov	Hardware reservation of cyber-physical production of the Industry 4.0.		2020									0	
309	RG029				1 Zakoldiev	Gurjanov	Shukalov	Information reservation of cyber-physical production of the Industry 4.0		2020									0	
310	RG038				1 Zakoldiev	Shukalov	Zharinov	Modular architecture of cyber-physical production for Industry 4.0.		2019	•	•	•	•	•	•	•	•	2	
311		SD041	1 Zarco		Siegert	Bauerhansel	Software Model Requirements Applied to a Cyber-Physical Modular Robot in Production Environment			2019	•	•	•	•	•	•	•	•	4	
312		IEEE063		1 Zelenin	Eliseev	Popov	Development and Implementation Experience of Microprocessor Emulators for Cyber-Physical AVR Testing Complexes			2019									0	
313		WS011	1 Zhang	Zhang	Yan	Digital twin-driven cyber-physical production system towards smart shop-floor				2019	•								1	
314	GS035			1 Zhang	Yan	Zhenghua	Information modeling for cyber-physical production system based on digital twin and AutomationML			2020	•	•	•	•	•	•	•	•	4	
315		IEEE065	WS034	2 Zhu	Zhang	-	A Cyber-Physical Production System Framework of Smart CNC Machining Monitoring System			2018	•	•	•	•	•	•	•	•	3	
											2 1 3 3 0 2 1 1 3 0 0 1 1 1 0 0 1	Σ der identifizierten Erwähnungen dokumentenübergreifend								

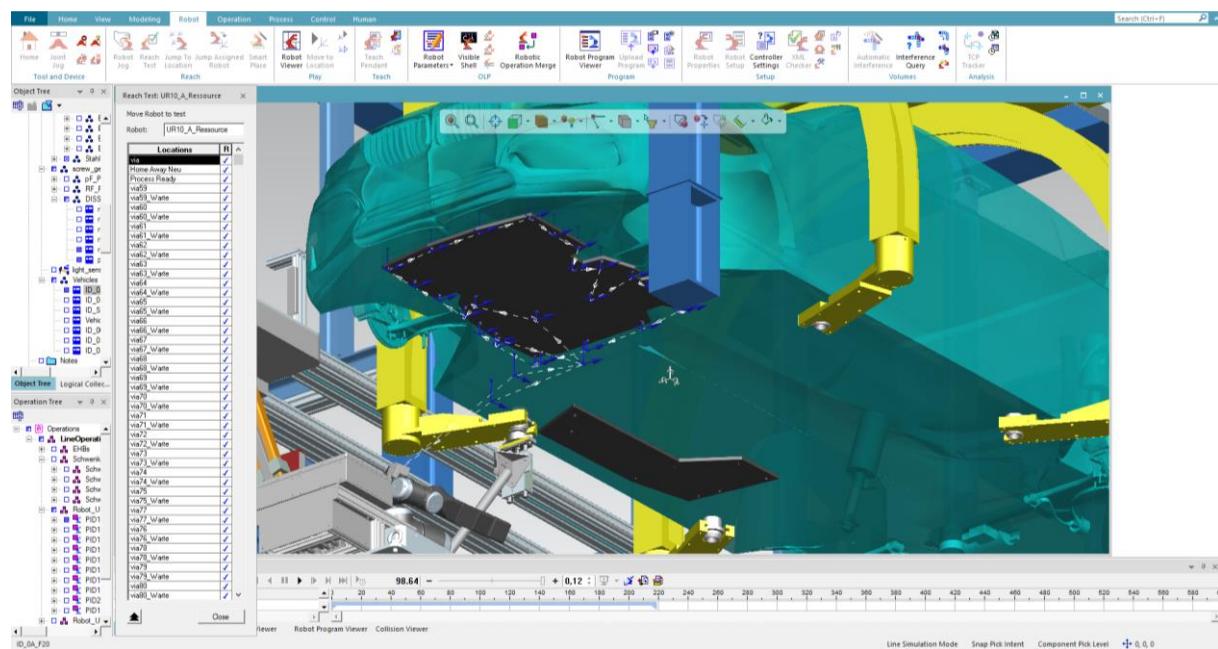
VII. Anhang 5.3

References		Features	Number of registrations																																							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40			
[7]	Weber et al. 2015	A CPS																																								
		B CPSS																																								
		C Simulation																																								
		D Virtual Commiss.																																								
		E Adaptivity																																								
		F Agility																																								
		G Adjustability																																								
		H De-centrality																																								
		I Flexibility																																								
		J Integrability																																								
		K Interoperability																																								
		L Compatibility																																								
		M Mobility																																								
		N Modularity																																								
		O Neutrality																																								
		P Reconfigurability																																								
		Q Robustness																																								
		R Scalability																																								
		S Changeover ability																																								
		T Universality																																								
		U Changeability																																								
		V Versatility																																								
		Reference	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
		Discussed keywords	8	10	12	13	10	8	13	12	17	18	19	5	10	16	7	5	9	11	7	15	9	11	10	9	4	10	8	7	14	12	16	7	11	11	8	10	5	14	16	7

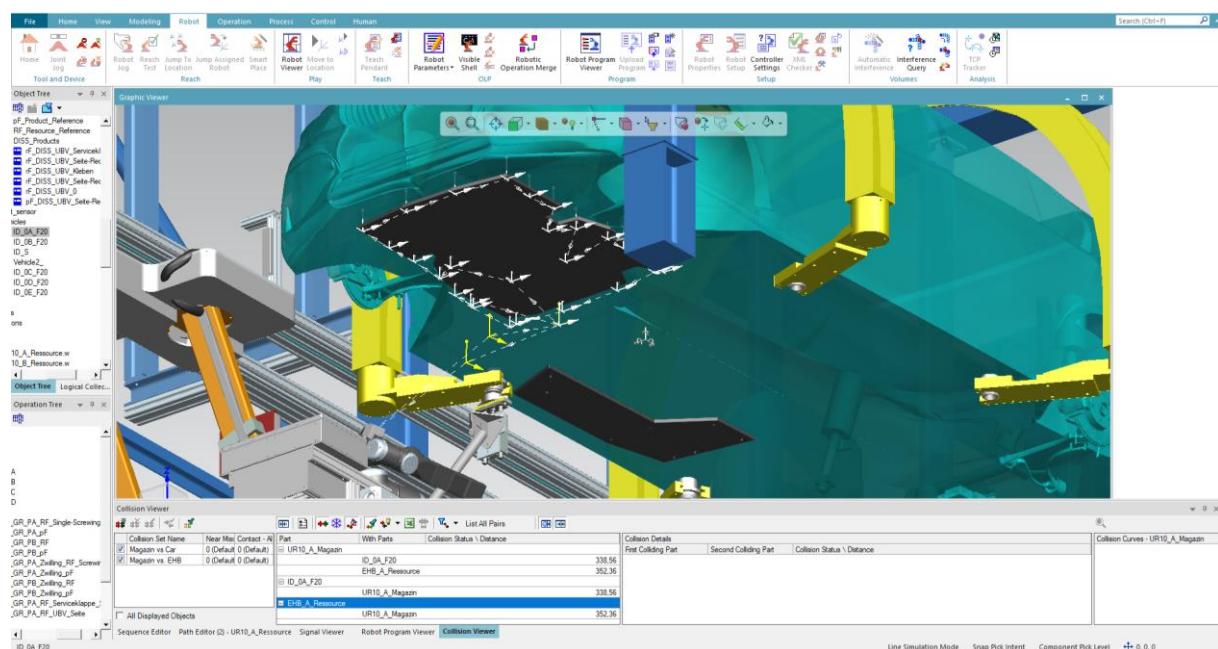
Legende - Farbcodierung	
Befähiger der Agilität	Themenlicher referenzierter Inhalt der Arbeit
Begünstiger der Modularität	Thema der Arbeit ohne weiteren Bezug
Befähiger für "Changeability"	Thema der Arbeit mit Bezug zu CPS
Befähiger der Rekonfigurationsfähigkeit	Thema der Arbeit mit Bezug zu CPSS
Befähiger der Wandelungsfähigkeit	Befähiger der Flexibilität
	Befähiger der Veränderungsfähigkeit

VIII. Anhang 8.3.2

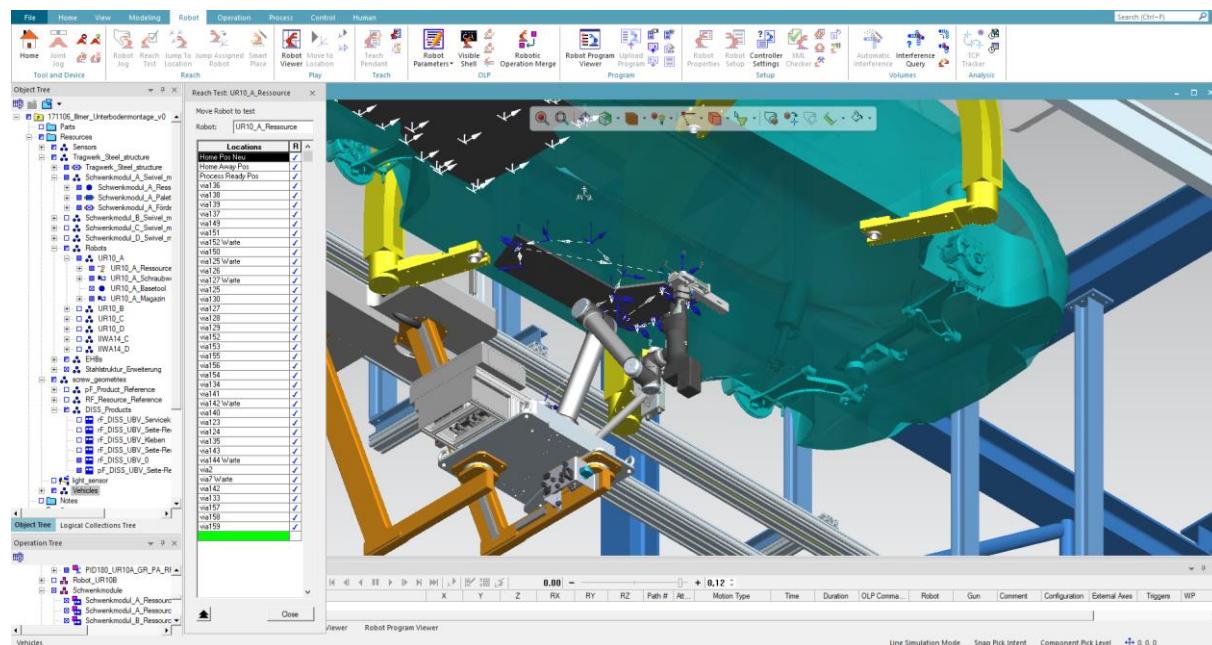
Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung - UBV0: Erreichbarkeit erfolgreich.



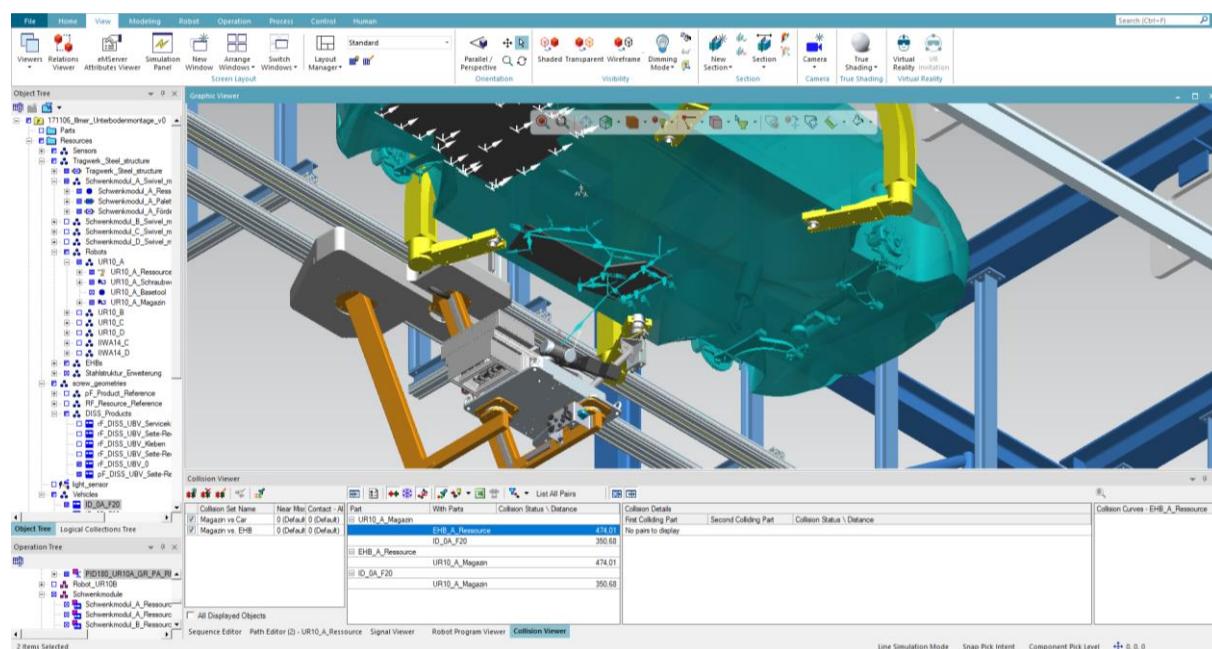
Ergebnis der Kollisionsuntersuchung - UBV0: Kollisionsfreie Simulation.



Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung – UBV1 (Seite): Erreichbarkeit erfolgreich.

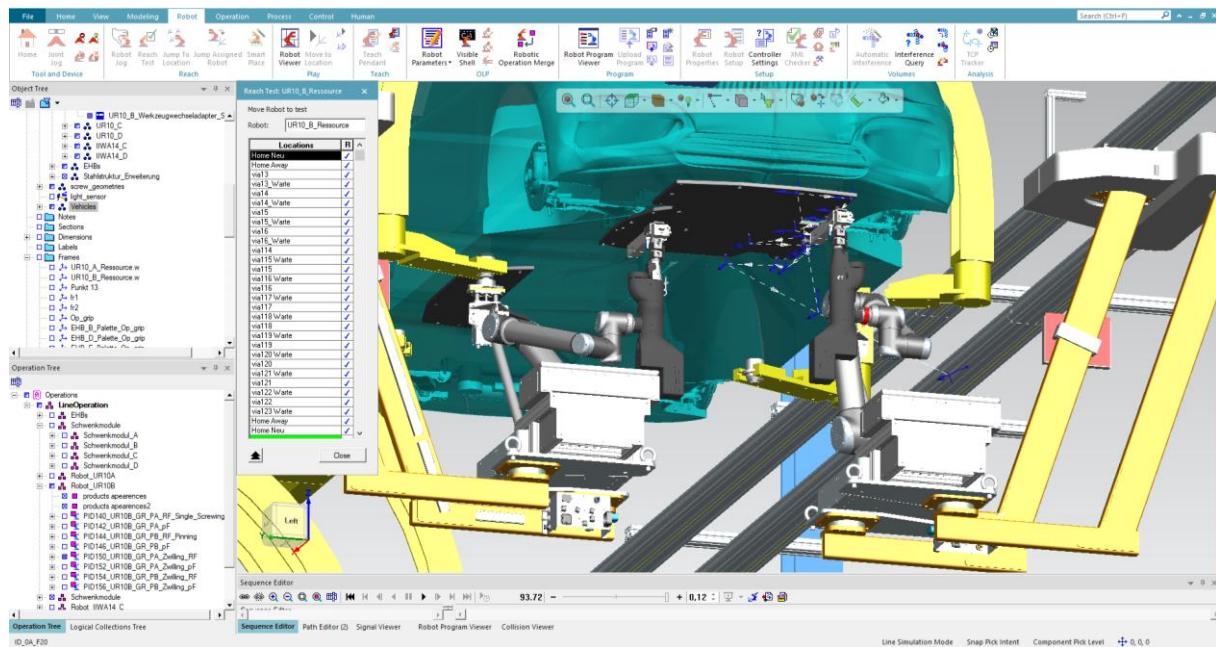


Ergebnis der Kollisionsuntersuchung – UBV1 (Seite): Kollisionsfreie Simulation.

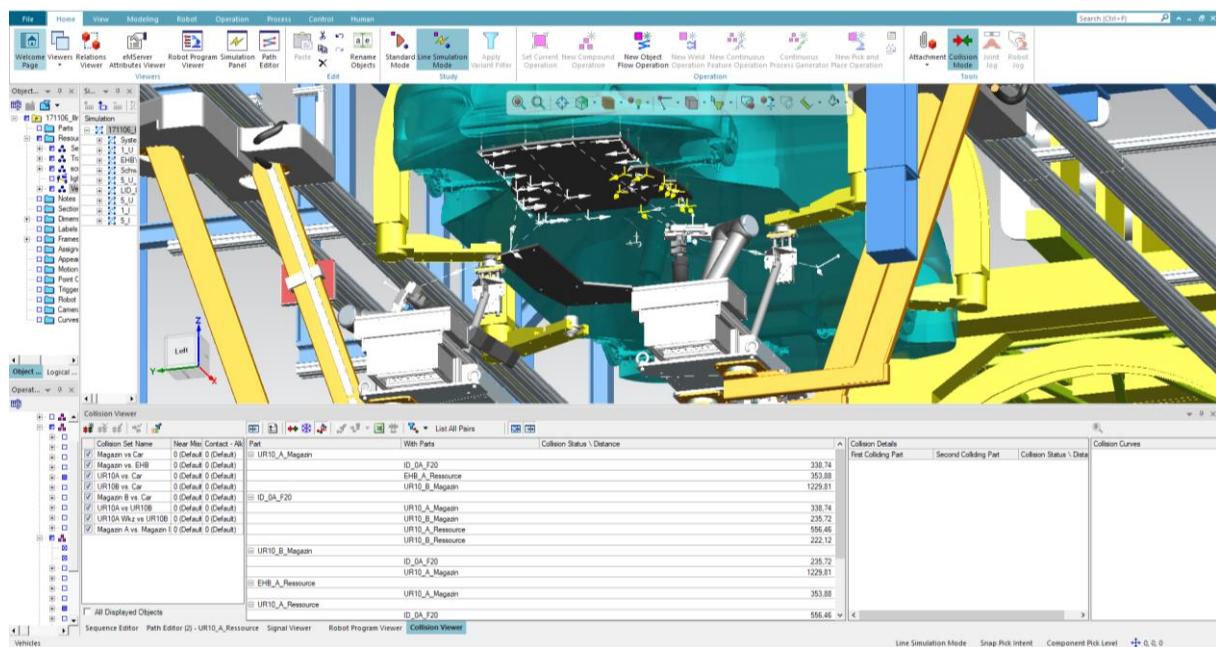


IX. Anhang 8.3.3

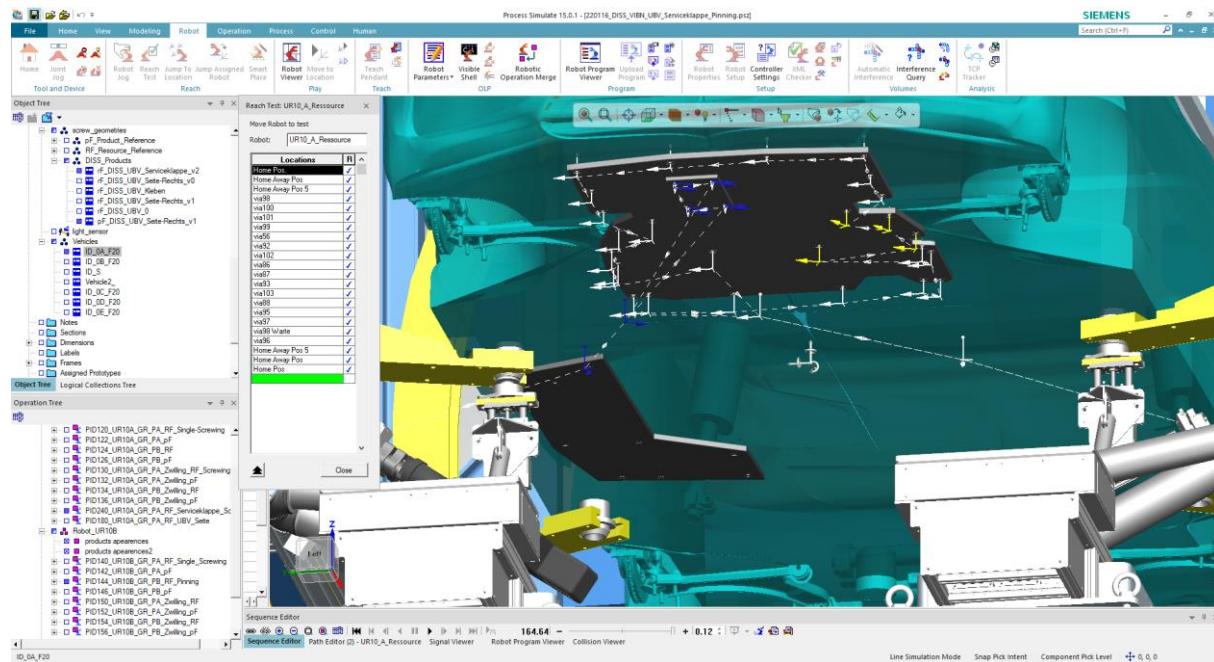
Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung – UBV0: Erreichbarkeit erfolgreich.



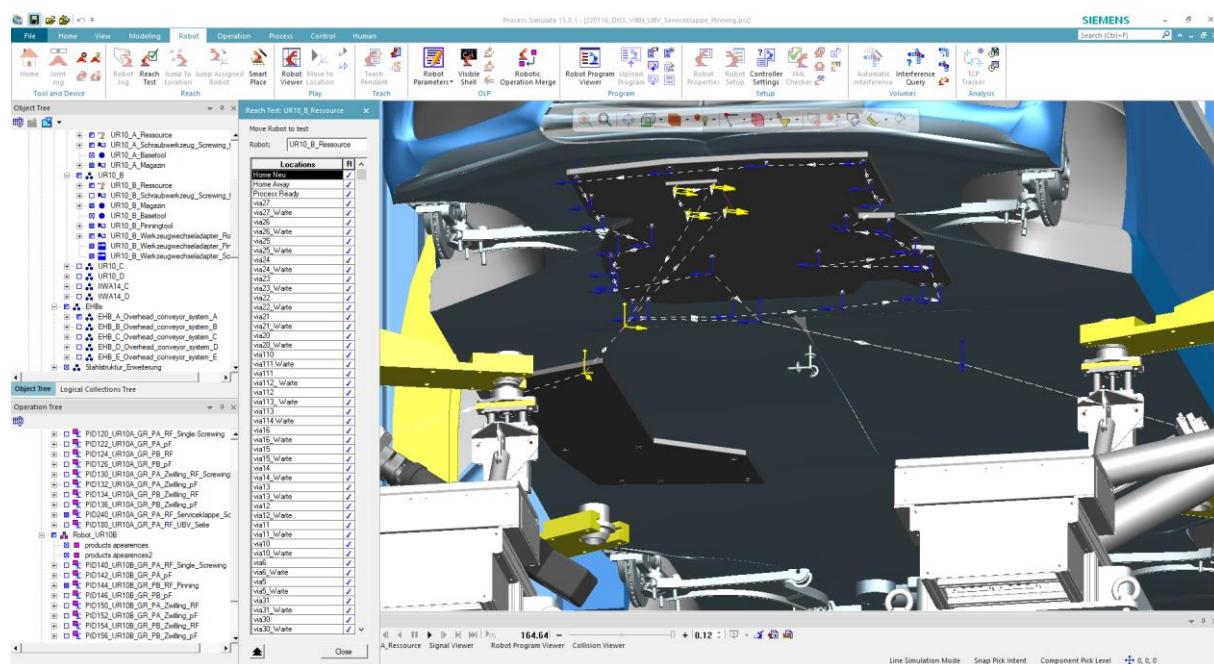
Ergebnis der Kollisionsuntersuchung – UBV0: Kollisionsfreie Simulation.



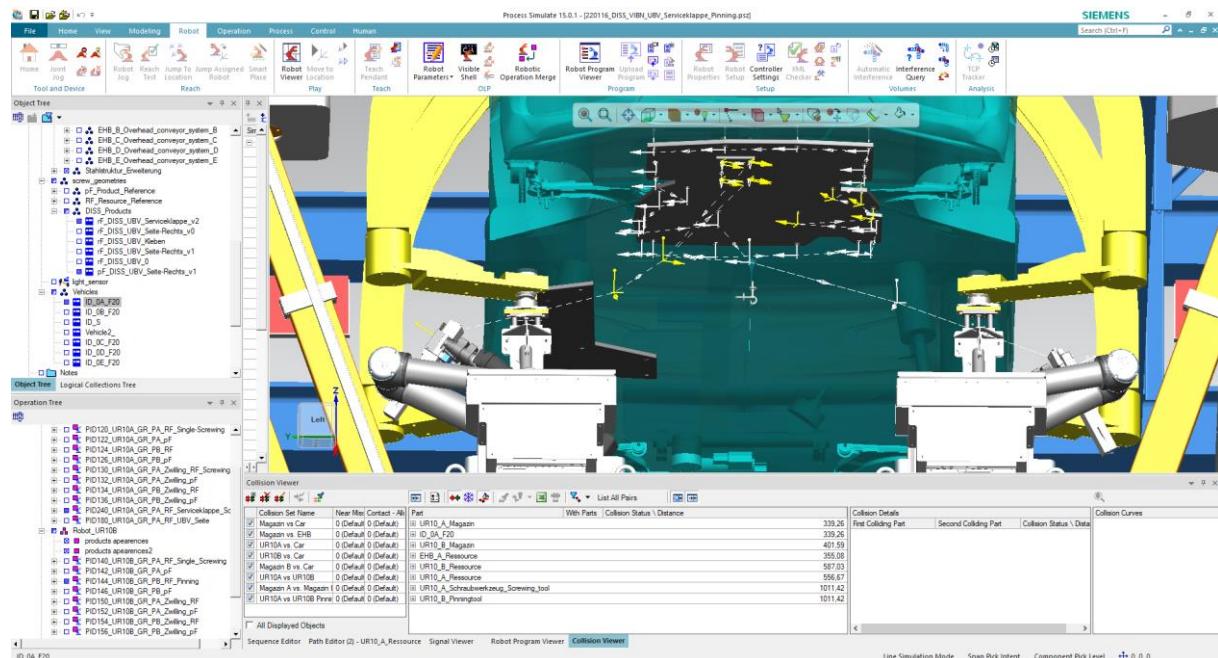
Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung Teil 1 – UBV2 (Service): Erreichbarkeit erfolgreich.



Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung Teil 2 – UBV2 (Service): Erreichbarkeit erfolgreich.

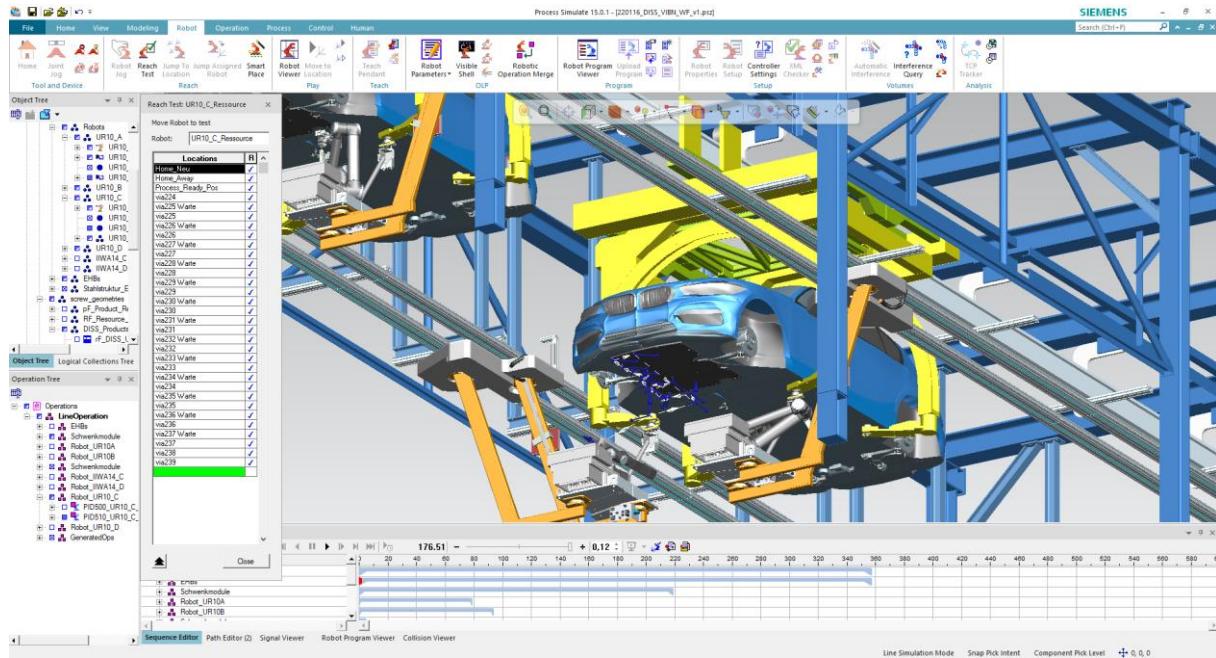


Ergebnis der Kollisionsuntersuchung – UBV2 (Service): Kollisionsfreie Simulation.

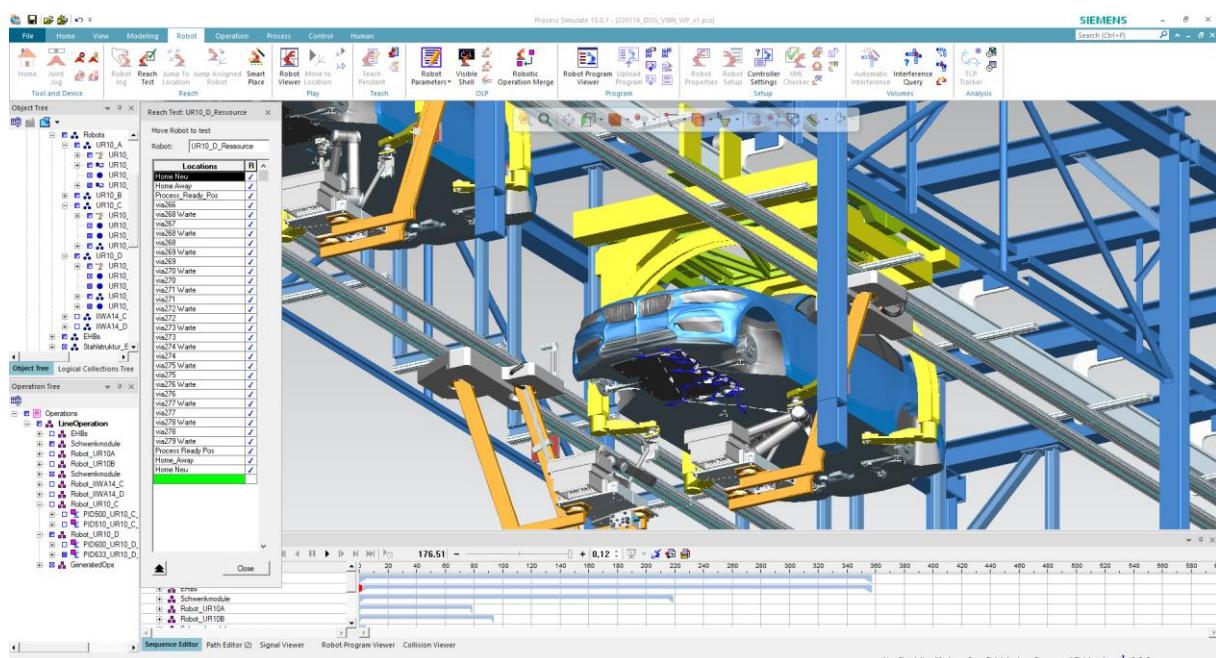


X. Anhang 8.3.4

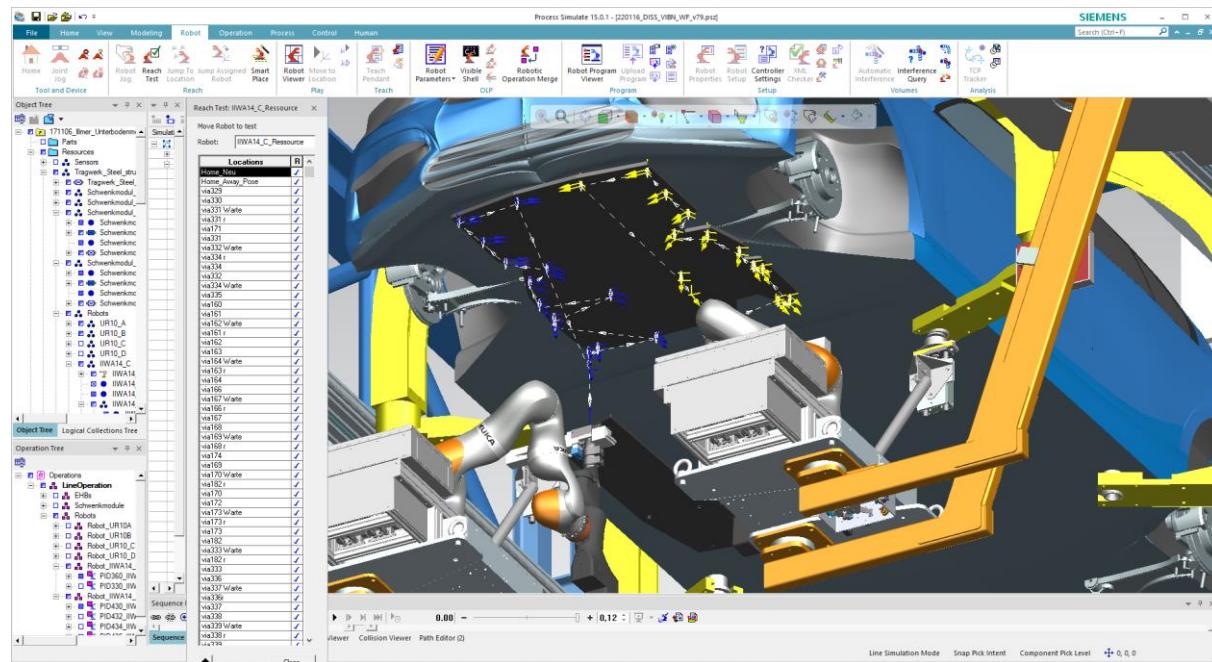
Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung Teil 1 – UBV0: Erreichbarkeit erfolgreich.



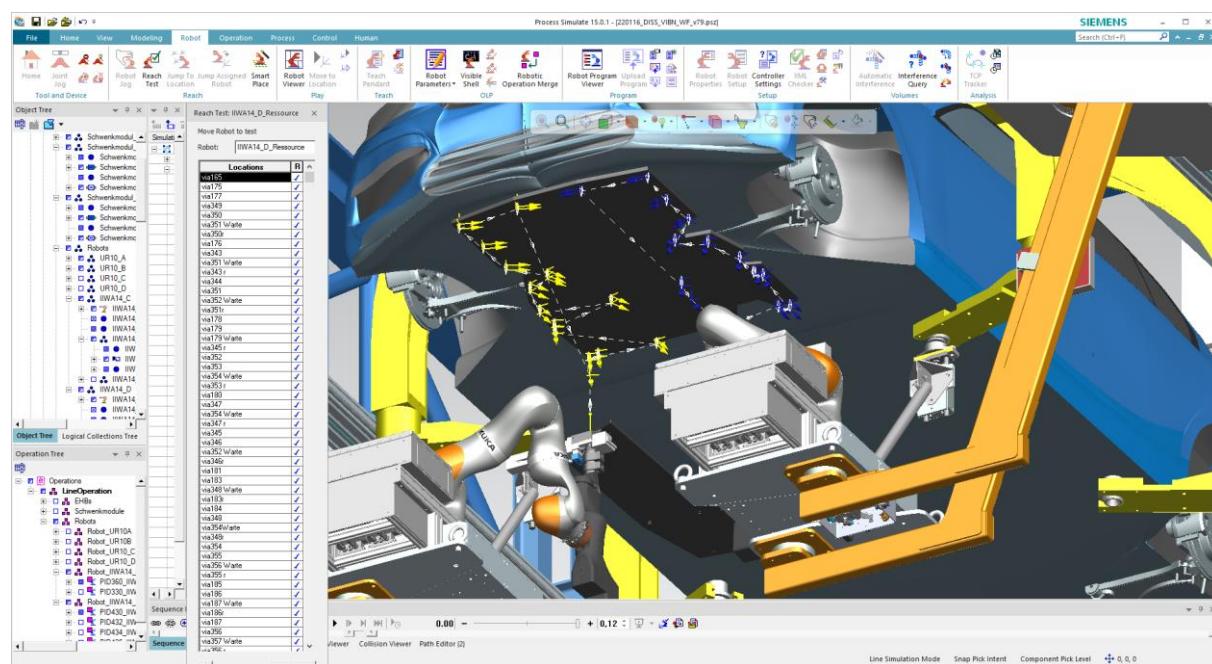
Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung Teil 2 – UBV0: Erreichbarkeit erfolgreich.



Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung Teil 3 – UBV0: Erreichbarkeit erfolgreich.



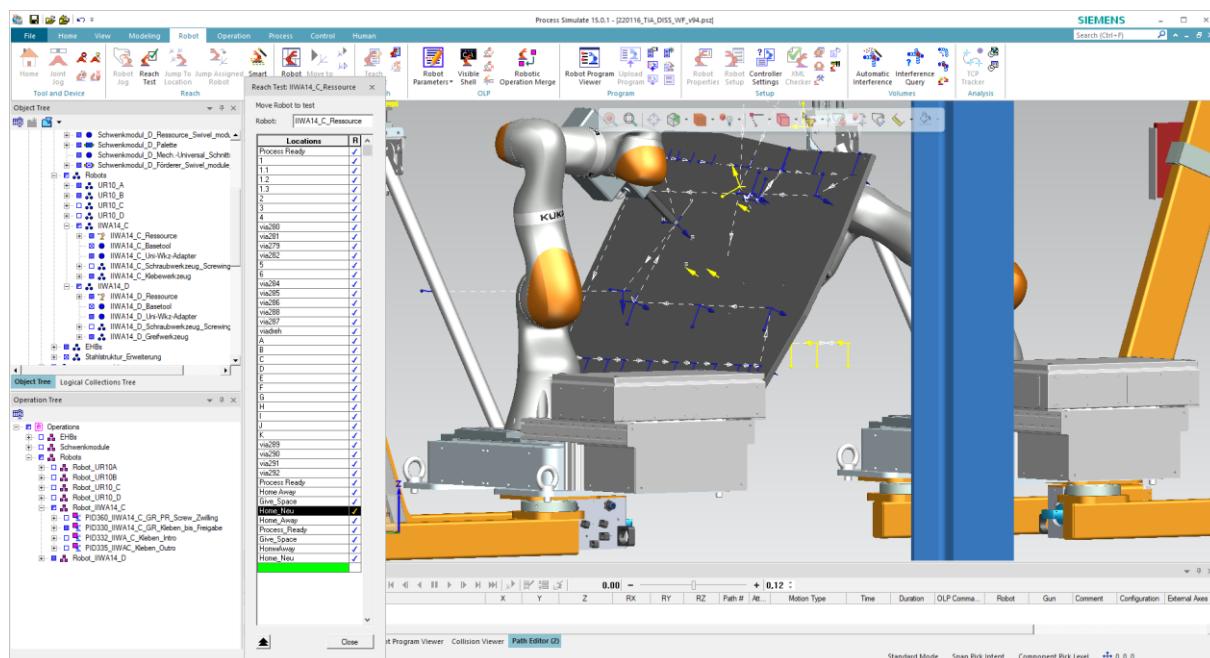
Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung Teil 4 – UBV0: Erreichbarkeit erfolgreich.



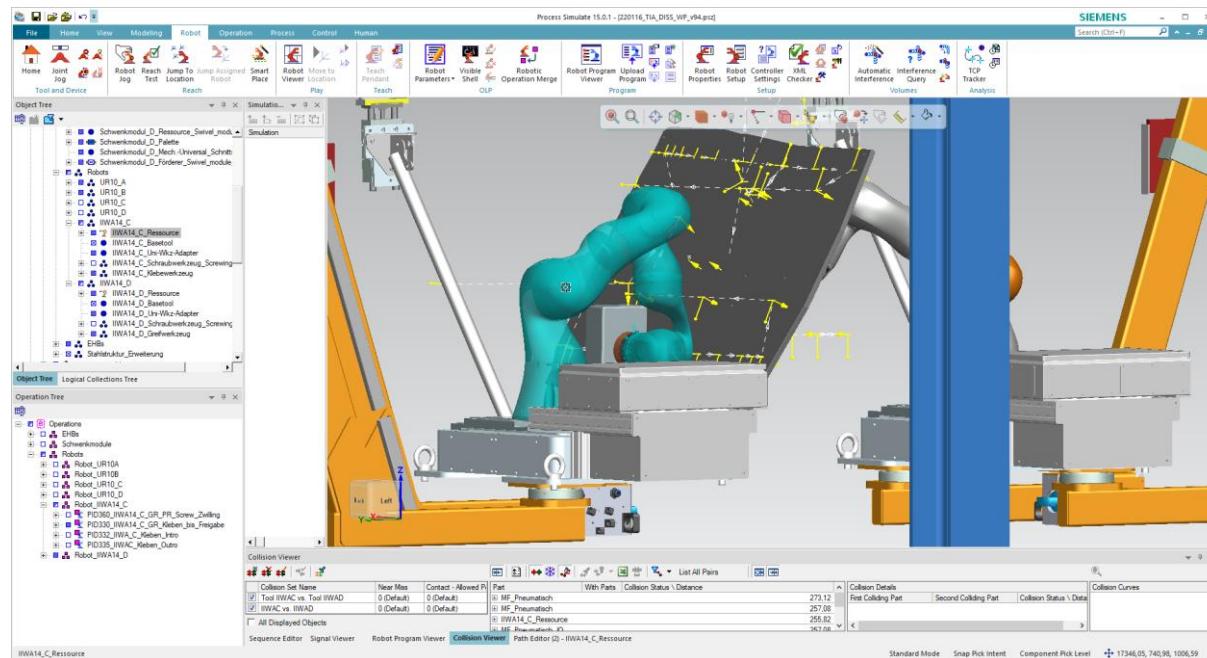
Ergebnis der Kollisionsuntersuchung – UBV0: Kollisionsfreie Simulation.



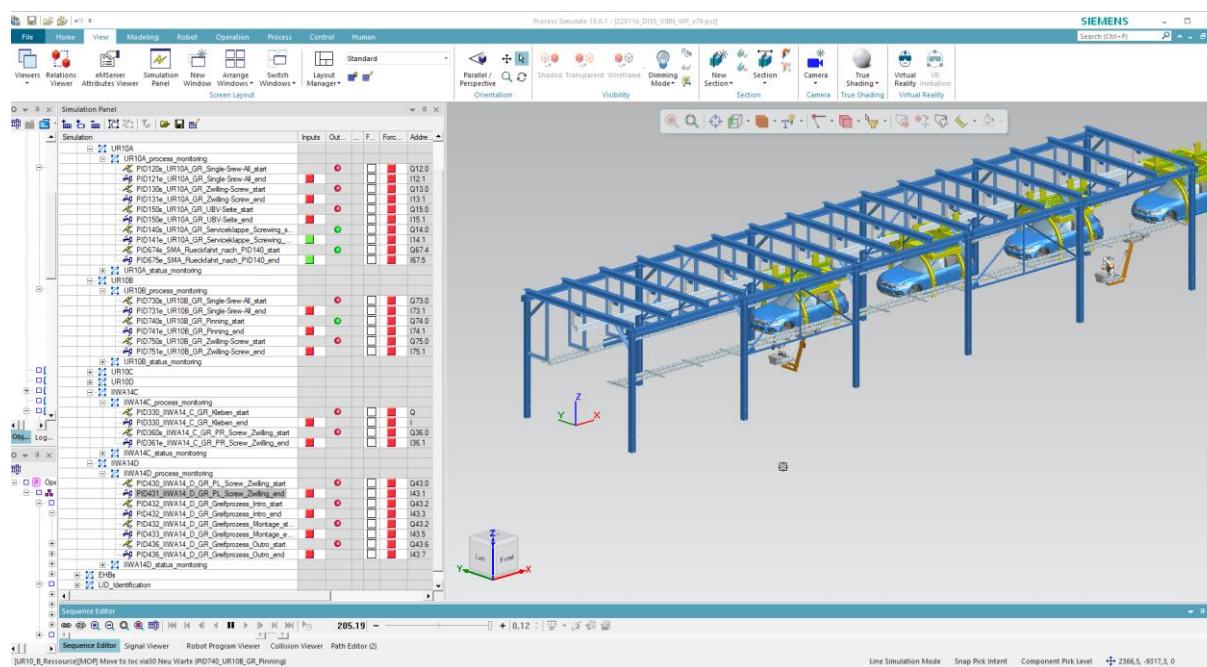
Ergebnis der Erreichbarkeitsuntersuchung Teil 5 – UBV2 (Service) kleben: Erreichbarkeit erfolgreich.



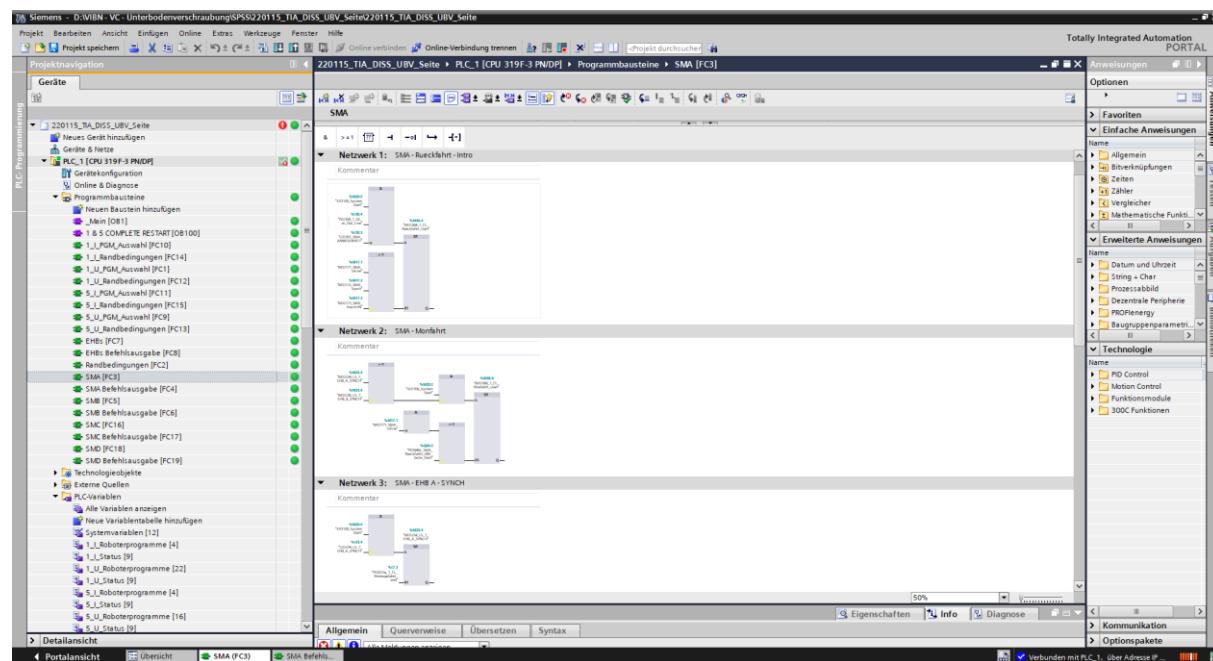
Ergebnis der Kollisionsuntersuchung – UBV2 (Service) kleben: Kollisionsfreie Simulation.



Ausschnitt der Signalansicht während der virtuellen Inbetriebnahme.



Ausschnitt aus dem Automatisierungsportal während der virtuellen Inbetriebnahme.



Ausschnitt aus der Variablenliste des Automatisierungsportals

Name	Variablenart	Datentyp	Adresse	Remarque	Ereig...	Schalt...	Kommentar
SD0001_System_Aus	Systemvariablen	Bool	%IO0.0				System startet System ein
SD0001_Schalt_aus_Bereit	Systemvariablen	Bool	%IO1.0				Hoch-Aus_Schalter, System wird ausgesch.
SD0002_Fehler_gummireifen	Systemvariablen	Bool	%IO2.0				Fehler gummireifen Schalter um aktive Rück...
SD0003_System_Start	Systemvariablen	Bool	%IO3.0				System Start schalter
SD0005_System_Stop	Systemvariablen	Bool	%IO4.0				System Stop schalter - System bleibt aber...
SD0005_Stop_Tester	Systemvariablen	Bool	%IO5.0				Normally Closed
SD0006_Start_Tester	Systemvariablen	Bool	%IO6.0				Normally Open
SD001_0_Aktenkoffer	Systemvariablen	Bool	%IO7.0				Normalclosed
SD001_1_Schneeklampe	Systemvariablen	Bool	%IO1.1				
P0120_JUR1DA_GR_Single-Ser...	UR10_Roboterpo...	Bool	%Q1.2.0				
P0121_JUR1DA_GR_Single-Ser...	UR10_Roboterpo...	Bool	%Q12.1				
P0130_JUR1DA_GR_Zwilling_S...	UR10_Roboterpo...	Bool	%Q13.0				
P0131_JUR1DA_GR_Zwilling_S...	UR10_Roboterpo...	Bool	%Q13.1				
LD0215_L1_5_EHB_A_SYNCH	Light Sensors	Bool	%Q23.4				
LD0215_L1_5_EHB_B_SYNCH	Light Sensors	Bool	%Q23.5				
LD0217_L1_5_EHB_B_SYNCH	Light Sensors	Bool	%Q23.6				
P0730_JUR10B_GR_Single-Ser...	UR10B_Roboterpo...	Bool	%Q73.0				
P0731_JUR10B_GR_Single-Ser...	UR10B_Roboterpo...	Bool	%Q73.1				
P0740_JUR10B_GR_Programm...	UR10B_Roboterpo...	Bool	%Q74.0				
P0741_JUR10B_GR_Programm...	UR10B_Roboterpo...	Bool	%Q74.1				
RD114_JUR10_at_Home_Status	UR10_Status	Bool	%W11.4				
RD113_JUR10_BoltedReady	UR10_Status	Bool	%W11.3				
RD112_JUR10_ProgramPause	UR10_Status	Bool	%Q11.2				
RD111_JUR10_ProgramEnd...	UR10_Status	Bool	%W11.1				
RD120_JUR10_programmnum..._UR10_Status	Bool	Byte	%Q812				
RD121_JUR10_startProgramm..._UR10_Status	Bool	Bool	%Q11.0				
RD122_JUR10_endProgramm..._UR10_Status	Bool	Bool	%Q11.0				
RD116_JUR10_anthroProgram..._UR10_Status	Bool	Bool	%W11.6				
RD115_JUR10_emergencySTOP_UR10_Status	Bool	Bool	%M0.0				
XD100_SystemStart	Systemvariablen	Bool					
LD259_L1_P01_productSecure	Light Sensors	Bool	%Q25.0				
RD707_JUR10_at_Home_Neu	UR10_Status	Bool	%Q70.4				
RD712_JUR10_noBody	UR10_Status	Bool	%Q71.2				
RD713_JUR10_noHead	UR10_Status	Bool	%Q71.3				
RD717_JUR10_programEnd..._UR10_Status	Bool	Bool	%Q70.1				
RD718_JUR10_programEnd..._UR10_Status	Bool	Bool	%Q70.7				
RD719_JUR10_miroProgram..._UR10_Status	Byte	Byte	%W71.1				
RD705_JUR10_emroProgramm..._UR10_Status	Bool	Bool	%Q70.6				
RD700_JUR10_emergencyStop_UR10_Status	Bool	Bool	%Q70.0				

Wissenschaftliche Veröffentlichungen

Illmer, B., Vielhaber, M.

Describing cyber-physical systems using production characteristics and methodical integration into virtual commissioning in: *Proceedings of the 8th CIRP Conference on Assembly Technology and Systems (CIRP-CATS)*, 29.09.-01.10.2020, Athen, Greece, Procedia CIRP, Vol. 97, 2021, S. 272-277.

Illmer, B., Vielhaber, M.

Cyber-physical systems and production characteristics – classification and visualization of relationships in: *Proceedings of the 53rd CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS)*, 01.-03.07.2020, Chicago, IL, USA, Procedia CIRP, Vol. 93, 2020, S. 186-191.

Illmer, B., Karkowski, M., Vielhaber, M.

Petri net controlled virtual commissioning – A virtual Design-loop approach in: *Proceedings of the 30th CIRP Design Conference. Enhancing design though the 4th industrial revolution thinking*, 05.-08.05.2020, Kruger National Park, South Africa, Procedia CIRP, Vol. 91, 2020, S. 152-157.

Illmer, B., Vielhaber, M.

Synchronizing Digital Process Twins between virtual products and resources – A virtual design method in: *Proceedings of the 29th CIRP Design Conference*, 08.-10.5.2019, Póvoa de Varzim, Portugal, Procedia CIRP, Vol. 84, 2019, S. 532-537.

Illmer, B., Vielhaber

Virtual Validation of Decentrally Controlled Manufacturing Systems with Cyber-Physical Functionalities in: *Proceedings of the 51st CIRP Conference on Manufacturing Systems (CIRP-CMS)*, 16.-18.5.2018, Stockholm, Schweden, Procedia CIRP 72, 2018, S. 509-514.

Illmer, B.; Vielhaber, M.

Auswirkungen hochvernetzter Systeme auf die Modellarchitektur der virtuellen Inbetriebnahme in: Brökel, K., Grote, K.-H., Stelzer, R., Rieg, F., Feldhusen, J., Müller, N., Köhler, P. (Hrsg.), 15. *Gemeinsames Kolloquium Konstruktionstechnik 2017 – Interdisziplinäre Produktentwicklung* 05.-06.10.2017, Duisburg, Universität Duisburg-Essen 2017, S. 297-306.

Illmer, B., Kaspar, J., Vielhaber, M.

Cyber-Physical Effects on the Virtual Commissioning Architecture in: *DS 87-5 Proceedings of the 21th International Conference on Engineering Design (ICED 17)*, 21.-25.08.2017, Vancouver, Canada, Design for X, Design to X, Vol. 5, 2017, S. 169-178.