

FAU Studien aus dem Maschinenbau 450

Tobias Lechler

Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme

Tobias Lechler

Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter
Produktionssysteme

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 450

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Tobias Lechler

Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung
und Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen

FAU University Press

2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Kontakt: Tobias Lechler, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, (^{ROA} <https://ror.org/oof7hpc57>)

Bitte zitieren als

Lechler, Tobias. 2024. *Der Digitale Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 450. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-692-3

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt. Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren. Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar: <https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-691-6 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-692-3 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-692-3

**Der Digitale Zwilling im Ramp-down
automatisierter Produktionssysteme**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur

Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Tobias Lechler, M.Sc.

aus Pforzheim

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen
Prüfung: 22.04.2024

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber und meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke für seine Unterstützung bei meinen Forschungstätigkeiten sowie für das in mich gesetzte Vertrauen. Das von ihm geschaffene Umfeld am Lehrstuhl hat es mir ermöglicht, an verschiedenen innovativen Themen zu arbeiten und hat maßgeblich zu meiner persönlichen und fachlichen Weiterentwicklung beigetragen. Darüber hinaus gilt mein Dank Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza für die Übernahme des Korreferats sowie Prof. Dr. Martin Matzner als weiteres Mitglied der Prüfungskommission und Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Großer Dank gilt meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl FAPS für die fachlichen Diskussionen und die inspirierende Arbeitsatmosphäre. Besonders bedanken möchte ich mich bei den Kollegen der Forschungsbereiche Engineering-Systeme und Automatisierungstechnik für die enge Zusammenarbeit sowie gemeinsame Aktivitäten während meiner Zeit am FAPS. Hervorheben möchte ich Matthias Brossog für die Unterstützung meiner Aktivitäten in seiner Funktion als Forschungsbereichsleiter, Martin Sjarov für die zahlreichen fachlichen Diskussionen sowie Petar Vukovic und Fabian Hartner für den engen Austausch über die Zeit am FAPS hinaus, der maßgeblich zum Abschluss der vorliegenden Arbeit geführt hat.

Des Weiteren möchte ich mich bei allen Studentinnen und Studenten bedanken, die mich während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl unterstützt und damit einen wichtigen Beitrag zur Entstehung der vorliegenden Arbeit geleistet haben.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, allen voran meinen Eltern, die mir diesen Bildungsweg ermöglicht und mich dabei stets uneingeschränkt unterstützt sowie gefördert haben, sowie meiner Frau Marjanna, die mich auf meinem Weg bedingungslos unterstützt und immer wieder motiviert hat.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis.....	xvii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	4
2 Der Ramp-down automatisierter Produktionssysteme	7
2.1 Grundlagen automatisierter Produktionssysteme	7
2.1.1 Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme	9
2.1.2 Planung automatisierter Produktionssysteme.....	10
2.1.3 Produktionsplanung und -steuerung automatisierter Produktionssysteme	12
2.2 Ramp-down Management	14
2.2.1 Grundlagen des Ramp-downs.....	14
2.2.2 Herausforderungen des Ramp-down Managements.....	16
2.2.3 Bestehende Ansätze des Ramp-down Managements.....	18
2.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	30
3 Der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme ..	33
3.1 Ereignisdiskrete Materialflusssimulation von Produktionssystemen.	34
3.1.1 Grundlagen der Simulation.....	34
3.1.2 Durchführung von Simulationsstudien	35
3.1.3 Einsatzgebiete der ereignisdiskreten Materialflusssimulation	37
3.2 Der Digitale Zwilling.....	39
3.2.1 Begriffsdefinition.....	40
3.2.2 Verwandte Konzepte	42
3.2.3 Das Digital Twin Structure Model	45
3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerung.....	48

4	Forschungsbedarf zum simulationsbasierten Digitalen Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme	51
4.1	Erkenntnisse aus dem Stand der Wissenschaft und Technik	51
4.2	Konkretisierung des Forschungsbedarfs anhand von Forschungsfragen an den Digitalen Zwilling automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down.....	54
4.3	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	55
5	Konzipierung des Digitalen Zwillings für den Ramp-down automatisierter Produktionssysteme	57
5.1	Das automatisierte Produktionssystem.....	58
5.1.1	Struktur automatisierter Produktionssysteme	59
5.1.2	Manuelle Tätigkeiten in automatisierten Produktionssystemen.....	60
5.2	Das ereignisdiskrete Simulationsmodell automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down.....	62
5.2.1	Strukturdaten des Simulationsmodells	63
5.2.2	Ablaufdaten des Simulationsmodells	67
5.2.3	Metamodell des Simulationsmodells automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down	70
5.2.4	Produktionsbezogene Kennzahlen im Simulationsmodell	73
5.3	Der Digitale Schatten	76
5.3.1	Daten des Digitalen Schattens	76
5.3.2	Datenquellen des Digitalen Schattens.....	77
5.3.3	Datenaufbereitung.....	80
5.3.4	Datenspeicherung.....	84
5.4	Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings im Ramp-down.....	86
5.4.1	Vorbereitung der Experimentierumgebung	87
5.4.2	Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße	90
5.4.3	Optimierung der Auftragsreihenfolge	91
5.4.4	Optimierung des Mitarbeitereinsatzes.....	93
5.4.5	Simulation von Strukturanpassungen	94

6	Methode DT₄RampDown für den Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme	97
6.1	Detailierung der Methode DT ₄ RampDown	98
6.1.1	Zieldefinition und Bildung des Projektteams	98
6.1.2	Analyse verfügbarer IT-Systeme und bestehender Simulationsmodelle	100
6.1.3	Datensammlung und -aufbereitung.....	101
6.1.4	Modellierung und Modellanpassung	103
6.1.5	Verifikation und Validierung.....	104
6.1.6	Anwendung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation ...	105
6.1.7	Festlegung von Maßnahmen	107
6.1.8	Dokumentation	108
6.2	Einordnung der Methode DT ₄ RampDown in das übergeordnete Ramp-down Management	109
7	Beispielhafte Implementierung und Validierung des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down	111
7.1	Ramp-down Planung für den auslaufenden Serienbetrieb eines automatisierten, variantenreichen Produktionssystems	111
7.1.1	Zieldefinition und Bildung des Projektteams	112
7.1.2	Analyse verfügbarer IT-Systeme und bestehender Simulationsmodelle	113
7.1.3	Datensammlung und -aufbereitung.....	114
7.1.4	Modellierung des ereignisdiskreten Simulationsmodells.....	116
7.1.5	Verifikation und Validierung.....	118
7.1.6	Anwendung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation in der Ramp-down Planung	119
7.1.7	Festlegung von Maßnahmen	123
7.1.8	Dokumentation	124
7.2	Beurteilung des Einsatzes des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme	125
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	129
9	Summary and outlook.....	133
10	Anhang.....	137
10.1	Weitere Veröffentlichungen	137
	Literaturverzeichnis.....	139

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

BOM	Bill of Materials
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CIM	Computer Integrated Manufacturing
CT	Taktzeit
DMU	Digital Mock-Up
DTSM	Digital Twin Structure Model
EOL	End of Life
EOP	End of Production
ERP	Enterprise Resource Planning
F	Forschungsfrage
FlexMEA	Flexibility Mode and Effect Analysis
FMC	Fundamental Modeling Concepts
F_S	Faktorstufenanzahl
HMI	Human Machine Interface
IFR	International Federation of Robotics
KPI	Key Performance Indicator
L_{Kipp}	Losgrößen kipp punkt
L_{max}	Maximale Losgröße
L_{min}	Minimale Losgröße
M	Mitarbeiteranzahl
MES	Manufacturing Execution System
MTTR	Mean Time to Repair
n_A	Anzahl an Aufträgen
n_F	Anzahl betrachteter Faktoren
n_O	Anzahl an Observationen
n_P	Anzahl an Produktvarianten
n_V	Anzahl notwendiger Versuche
OEE	Overall Equipment Effectiveness

PDM	Product Data Management
PLM	Product Lifecycle Management
PM	Prozessmodul
PPR	Produkt, Prozess und Ressource
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
<i>S</i>	Schrittweite
<i>s</i>	Sekunden
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
T_H	Handhabungszeit
T_P	Prozesszeit
T_R	Rüstzeit
T_{rR}	Reine Rüstzeit
T_S	Stauzeit
T_{SB}	Störungsbeseitigungszeit
T_W	Wartezeit
UC	Anwendungsfall
UML	Unified Modeling Language
VBA	Visual Basic for Applications
<i>V</i>	Versuch
W	Wechselteile
WT	Werkstückträger

Bildverzeichnis

Bild 1: Aufbau der Arbeit	5
Bild 2: Einordnung des Produktionssystems in den Gesamtkontext der Produktion in Anlehnung an [12, 18].....	8
Bild 3: Vereinfachtes Lebenszyklusmodell von Produktionssystemen mit zwei unterschiedlichen Ausbringungsvarianten nach der Rekonfiguration in Anlehnung an [20, 21].....	9
Bild 4: Für die Planung von Produktionssystemen relevante Planungsaufgaben im Kontext der Planungsphasen und -schritte der Fabrikplanung in Anlehnung an [25, 26].....	11
Bild 5: Aufgabenreferenzsicht des Aachener PPS-Modells mit aufgeschlüsselten Kernaufgaben angepasst an automatisierte Produktionssysteme in Eigenfertigung in Anlehnung an [32].....	13
Bild 6: Gründe und Folgen eines Ramp-downs in Anlehnung an [6, 43]..	15
Bild 7: Ramp-down Strategien in Anlehnung an [6, 42, 44].....	15
Bild 8: Einordnung des Ramp-down Managements in den Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme in Anlehnung an [5, 20, 21]	16
Bild 9: Herausforderungen des Ramp-down Managements auf Basis von [6, 37-40, 45-47]	17
Bild 10: Verortung der Reduktions-, Rückbau- und Ersatzteilphase im Ramp-down von Produktionssystemen in Anlehnung an [20, 21, 37].....	20
Bild 11: Schematische Darstellung der Rückbauprinzipien auf Ebene der Prozessmodule (PM) in Anlehnung an [37, 42].....	20
Bild 12: Vorgehen der Auslaufplanung für die Terminierung des Produktauslaufs in Lieferketten in Anlehnung an [46]	25
Bild 13: 8-Phasenmodell des Auslaufreferenzprozesses in Anlehnung an [52].....	26
Bild 14: Anwendungsmodell des Serienauslaufs in der Produktion in Anlehnung an [45]	27

Bild 15: Generisches Prozessmodell zur Abwicklung von Ausläufen mit freiwilligen Aktivitäten in <i>kursiv</i> in Anlehnung an [6]	30
Bild 16: Gegenüberstellung bestehender Ramp-down Managementansätze anhand der Kriterien K1-K4.....	31
Bild 17: Chronologische Einordnung digitaler Lösungen und Systeme in der industriellen Anwendung (Abkürzungen sind dem Abkürzungsverzeichnis zu entnehmen) in Anlehnung an [9]	33
Bild 18: Zusammenhänge zwischen Systemen und Modellen im Kontext der Simulation in Anlehnung an [56]	35
Bild 19: Klassifikation von Simulationsmodellen inklusive Verortung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation in Anlehnung an [58]	35
Bild 20: Erweitertes Vorgehensmodell für die Durchführung von Simulationsstudien in Anlehnung an [59].....	36
Bild 21: Vier Möglichkeiten der Verknüpfung von Simulation und Optimierung in Anlehnung an [62]	37
Bild 22: Simulationseinsatz und Planungsinhalte eingeordnet in das Ebenenmodell der Produktion in Anlehnung an [63].....	38
Bild 23: Einordnung typischer Fragestellungen für die Simulation in den Lebenszyklus technischer Systeme in Anlehnung an [57]	38
Bild 24: Einsatzfelder der simulationsbasierten Optimierung anhand der Dimensionen Planungshorizont und Änderungsdynamik in Anlehnung an [27, 31]	39
Bild 25: Das Mirrored Spaces Model in Anlehnung an [66].....	40
Bild 26: Der Digitale Zwilling als nächste Stufe der Weiterentwicklung der Simulation in Anlehnung an [70]	41
Bild 27: Fokus der Digitalen Fabrik inklusive gängiger Werkzeuge in <i>kursiv</i> in Anlehnung an [77].....	44
Bild 28: Das DTSM mit den Achsen Lebenszyklus (I), Produkt-Prozess-Ressource (PPR) (II) und Physisch-Cyber (III) in Anlehnung an [P2]	45
Bild 29: Einordnung von Managementbereichen und datenbasierten Methoden und Werkzeugen anhand der vorhandenen Daten über den Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme in Anlehnung an [5, 20, 21]	52

Bild 30: Der Digitale Zwilling als Lösung produktionsbezogener Herausforderungen des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme	53
Bild 31: Zuordnung der Teilziele und Forschungsfragen zum Aufbau der Arbeit	55
Bild 32: Strukturierung des Kapitels 5 anhand des DTSM in Anlehnung an [P2, P3]	57
Bild 33: Schematische Darstellung eines automatisierten Produktionssystems inklusive des Materialflusses des Produkts sowie der Zuführteil- und Leergutmaterialflüsse	58
Bild 34: Automatisiertes Produktionssystem inklusive der Eingangs-, Ausgangs- und Stellgrößen in Anlehnung an [27]	63
Bild 35: Strukturierung simulationsrelevanter Daten nach COLLISI in Anlehnung an [82]	64
Bild 36: Übersicht der Daten automatisierter Produktionssysteme aus der Datenklasse S in Anlehnung an [82].....	66
Bild 37: Entscheidungspunkte und Logiken bei Parallelstationen und Ausschuss	67
Bild 38: Gegenüberstellung automatisierter und manueller bzw. teilautomatisierter Produktionssysteme.....	69
Bild 39: Beispielhafte Zusammenführung von SPS-Programmausschnitten (links) und produktspezifischen Ablauflisten (rechts) zu einem Ablaufdiagramm	69
Bild 40: Übersicht der Daten automatisierter Produktionssysteme aus der Datenklasse A in Anlehnung an [82]	70
Bild 41: Metamodell nach LÜTJEN angepasst und erweitert für automatisierte Produktionssysteme im Ramp-down in Anlehnung an [84]	72
Bild 42: Übersicht der Daten automatisierter Produktionssysteme aus der Datenklasse E in Anlehnung an [82]	73
Bild 43: Zeitachsen für die Berechnung produktionsbezogener KPIs in Anlehnung an [36]	74
Bild 44: Zeitmodell zur Berechnung der Mitarbeiterproduktivität in Anlehnung an [36]	75

Bild 45: Übersicht der Daten automatisierter Produktionssysteme aus der Datenklasse P in Anlehnung an [82]	77
Bild 46: Einordnung der Daten aus der Datenklasse P anhand ihrer Datenquellen aus der Automatisierungspyramide in Anlehnung an [85, P4]	78
Bild 47: Auflösung der Automatisierungspyramide in Anlehnung an [86]	79
Bild 48: Zusammensetzung der Taktzeit auf Basis der Prozess-, Handhabungs- und Stauzeiten	80
Bild 49: Zusammensetzung der MTTR aus Warte- und Störungsbeseitigungszeit.....	82
Bild 50: Beispielhafte Darstellung von Rüstmatrizen der Produktvarianten A bis D für jede Station	83
Bild 51: Zusammensetzung der Rüstzeit aus Wartezeit und reiner Rüstzeit	83
Bild 52: Vier Arten der digitalen Kopplung von Anwendungen in Anlehnung an [87]: 1. Dateitransfer, 2. geteilte Datenbank, 3. Remote Procedure Invocation, 4. Messaging	84
Bild 53: Möglichkeiten der Speicherung der Daten des Digitalen Schattens in Anlehnung an [88].....	85
Bild 54: Einordnung der Anwendungsfälle UC ₁ -UC ₄ Digitaler Zwillinge automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down in die Dimensionen des DTSM in Anlehnung an [P ₂]	87
Bild 55: Systematische Abarbeitung von Versuchsplänen anhand der Schritte 1. Versuchsplanerstellung, 2. Versuchsparameterübergabe, 3. Simulation, 4. Speicherung der Ergebnisdaten und 5. Auswahl des nächsten Versuches	89
Bild 56: Übersicht gängiger Optimierungsansätze im Kontext der Simulation von Produktion und Logistik in Anlehnung an [27] ..	89
Bild 57: Übersicht der Stellgrößen, Versuchsplanung und Ausgangsgrößen zur Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße	90
Bild 58: Identifikation des Losgrößenkipppunktes L_{Kipp} ab dem keine wirtschaftliche Produktion im bestehenden Produktionssystem mehr möglich ist.....	91

Bild 59: Übersicht der Stellgrößen, Versuchsplanung und Ausgangsgrößen zur Bestimmung der optimalen Auftragsreihenfolge	92
Bild 60: Übersicht der Stellgrößen, Versuchsplanung und Ausgangsgrößen zur Bestimmung des optimalen Mitarbeiterereinsatzes	93
Bild 61: Darstellung der OEE, der Mitarbeiterproduktivität und der Wartezeiten der Stationen über der Mitarbeiteranzahl zur Bestimmung der optimalen Mitarbeiteranzahl	94
Bild 62: Übersicht der Stellgrößen, Versuchsplanung und Ausgangsgrößen zur Simulation von Strukturanpassungen in der Planung des Produktionsrückbaus	95
Bild 63: Achtstufige Methode DT4RampDown für den Einsatz des Digitalen Zwillinges automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down.....	97
Bild 64: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Zieldefinition und Bildung des Projektteams.....	100
Bild 65: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Analyse verfügbarer IT-Systeme und bestehender Simulationsmodelle	101
Bild 66: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Datensammlung und -aufbereitung.....	101
Bild 67: Vierstufiges Vorgehen zur Datensammlung und -aufbereitung.....	102
Bild 68: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Modellierung und Modellanpassung	103
Bild 69: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Verifikation und Validierung	104
Bild 70: Reihenfolge der Anwendungsfälle des Digitalen Zwillinges im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme auf Basis der ereignisdiskreten Materialflusssimulation	105
Bild 71: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Anwendung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme.....	107
Bild 72: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Festlegung von Maßnahmen.....	107

Bild 73: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Dokumentation.....	109
Bild 74: Bild des Untersuchungsobjekts.....	112
Bild 75: Verortung des Untersuchungsobjekts in der stufenweisen Ramp-down Strategie in Anlehnung an [44].....	112
Bild 76: Übersicht der Datenquellen sowie daraus entnommener und aufbereiteter Daten des Untersuchungsobjekts.....	114
Bild 77: Systematische Darstellung eines automatisierten Produktionssystems mit eingezeichneter Systemgrenze für die Modellierung des Untersuchungsobjekts.....	117
Bild 78: Ausschnitt der Modellierung des Untersuchungsobjekts anhand des erweiterten Metamodells (s. Bild 41).....	118
Bild 79: Simulationsmodell des Untersuchungsobjekts in der Software Plant Simulation	118
Bild 80: Abweichung der OEE von der Realität zur Simulation ohne und mit Pausendurchlauf	119
Bild 81: Auswertung der OEE-Abweichung bei sinkender Losgröße und drei Mitarbeitern	120
Bild 82: Grafische Benutzeroberfläche zur wiederholten Durchführung der Optimierung der Auftragsreihenfolge.....	121
Bild 83: Auswertung der OEE- und Wartezeitabweichung über der Mitarbeiteranzahl bei einer Losgröße von 100	123

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht gängiger Engineeringmodelle für die Daten der Datenklasse S aus Typ und Instanz.....	65
Tabelle 2: Rüstzeitmatrix mit zwei Wechselteilen (W_1 , W_2) mit Beispielwerten.....	116
Tabelle 3: Die drei besten Ergebnisse einer beispielhaften Reihenfolgeoptimierung der Typen A bis E im Vergleich zum Referenzlauf.....	122
Tabelle 4: Übersicht weiterer Veröffentlichungen im Rahmen der Tätigkeit am Lehrstuhl FAPS	137

1 Einleitung

Die vorliegende Dissertation befasst sich mit dem Einsatz des Digitalen Zwillings in der Planung und der Durchführung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme. Dabei werden zwei Forschungsschwerpunkte untersucht: Die Konzeption des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme auf Basis der ereignisdiskreten Materialflusssimulation sowie die Integration dessen in ein methodisches Vorgehen zur Unterstützung der Planung und Durchführung des Ramp-downs.

1.1 Motivation

Der hohe Automatisierungsgrad in der Produktion ist für den Standort Deutschland aufgrund mehrerer Faktoren von Bedeutung. Deutschland trägt im weltweiten Vergleich im Jahr 2018 die fünfthöchsten Personalkosten im verarbeitenden Gewerbe [1]. Das im Vergleich zu anderen Ländern gleichbleibend hohe Kostenniveau des Standorts Deutschland im verarbeitenden Gewerbe wird durch die Jahresschätzung der Arbeitskosten des Jahres 2022 des statistischen Bundesamtes bestätigt [2]. Demnach ist ein hoher Automatisierungsgrad der Produktion im verarbeitenden Gewerbe für den Wirtschaftsstandort Deutschland unausweichlich, um im internationalen Wettbewerb konkurrenzfähig zu bleiben. Dies hat zur Folge, dass Deutschland laut der International Federation of Robotics (IFR) zu den fünf Ländern mit der am meisten automatisierten Produktion weltweit zählt und damit das am stärksten automatisierte Land Europas ist [3].

Globale Megatrends, wie die steigende Individualisierung von Produkten sowie kürzer werdende Produktlebenszyklen, stellen die klassische, starre Automatisierung der Produktion vor neue Herausforderungen [4]. Eine Flexibilisierung der bestehenden automatisierten Produktion sowie die Anpassung existierender Methoden der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) sind unausweichlich. Folglich existieren in der Forschung und Industrie eine Vielzahl an Lösungen zur Beschleunigung des Hochlaufs (engl. ramp-up) und der Skalierung der Produktion neuer Güter. Die Optimierungen des Hochlaufs fokussieren dabei eine Reduktion der Kosten sowie die Senkung der benötigten Zeit bei möglichst hoher Qualität [5].

Kürzere Produktlebenszyklen führen jedoch nicht nur zu vermehrt auftretenden Hochläufen, sondern auch zu einer im gleichen Maße steigenden Anzahl an Serienausläufen, sogenannten Ramp-downs. Dennoch werden Personalkapazitäten in der Industrie hauptsächlich für die Optimierung

des Hochlaufs neuer Produkte verwendet, wodurch der Ramp-down nur eine untergeordnete Rolle spielt [6, 7]. In Hinblick auf die Kosten eines Ramp-downs existieren nicht unerhebliche Einsparpotentiale in dessen gezielter Planung und Durchführung [8]. Ein Grund dafür, dass diese Potentiale aktuell selten ausgeschöpft werden, sind die im Vergleich zum Hochlauf fehlenden dedizierten Methoden und Werkzeuge, die den Herausforderungen des Ramp-downs gerecht werden.

Die Simulation ist eine Methode, die in der Planung und dem Betrieb der Produktion bereits breite Anwendung findet [9]. Im Zusammenspiel mit den Entwicklungen der Industrie 4.0 gewinnt in Forschung und Industrie aufbauend auf der Simulation das Konzept des Digitalen Zwillinges an Bedeutung. Laut einer Studie der Fraunhofer Gesellschaft in Zusammenarbeit mit der msg-Gruppe zum Digitalen Zwilling in der fertigen Industrie werden Digitale Zwillinge vermehrt zur Beschleunigung bestehender Abläufe eingesetzt. Die Einsatzgebiete Digitaler Zwillinge fokussieren jedoch noch stark die Produkte, wobei Digitale Zwillinge von Produktionssystemen seltener betrachtet werden. [10]

Auch in der Forschung nimmt die Anzahl an Publikationen zum Digitalen Zwilling stetig zu. Im Vergleich zur Industrie existiert hier bereits eine Vielzahl an Ansätzen von Digitalen Zwillingen automatisierter Maschinen und Anlagen. Die Anwendungsfälle des Digitalen Zwillinges fokussiert verschiedene Fragestellungen entlang des Lebenszyklus eines Produktionssystems. So können simulationsbasierte Digitale Zwillinge beispielsweise zur Beschleunigung des Serienhochlaufs oder zur Steigerung der Produktivität im Serienbetrieb eingesetzt werden. [P1]

Der methodische Einsatz des Digitalen Zwillinges zur Optimierung der Planung und Durchführung des Ramp-downs ist bis dato nicht bekannt.

1.2 Zielsetzung

Die dargelegte Motivation macht deutlich, dass noch nicht genutzte Potentiale in der Planung und Durchführung des Ramp-downs existieren, die mittels des Digitalen Zwillinges ausgeschöpft werden können. Ziel der vorliegenden Dissertation ist die erste Zusammenführung der beiden Themenkomplexe Ramp-down Management und Digitaler Zwilling für eine methodengestützte Planung und Durchführung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme. Zu dessen Erreichung werden die folgenden Teilziele definiert:

1. Strukturierung des simulationsbasierten Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme

Wie in der Motivation dargelegt, besitzt die automatisierte Produktion in Deutschland einen hohen Stellenwert. Für den Einsatz des Digitalen Zwillings in diesem Bereich bedarf es einer allgemeingültigen Strukturierung bestehend aus dessen Aufbau und Funktionen. Trotz der steigenden Anzahl an forschungsbezogenen und industriellen Anwendungsfällen Digitaler Zwillinge hat sich kein Standard etabliert, auf Basis dessen simulationsbasierte Digitale Zwillinge entwickelt werden können. Daher sollen Digitale Zwillinge auf Basis der in der Planung von Produktionssystemen bereits weit verbreiteten Materialflusssimulation beschrieben werden. Diese sollen das aus Sicht der Fertigungsplanung relevante Verhalten sowie die notwendigen Kennzahlen zur Bewertung von Planungsalternativen beinhalten. Um dies zu ermöglichen, müssen die dem Digitalen Zwilling zugrundeliegenden Daten, Modelle sowie deren Interaktionen beschrieben werden. Neben dem Einsatz in der Planung und der Durchführung des Ramp-downs sollen die Modelle in weiteren planerischen Fragestellungen über den gesamten Lebenszyklus ihrer realen Pendanten hinweg verwendet werden können.

2. Methode für den Einsatz simulationsbasierter Digitaler Zwillinge in der Planung und der Durchführung des Ramp-downs

Um eine effizientere Planung und Durchführung des Ramp-downs mittels eines Digitalen Zwillings zu ermöglichen, bedarf es einer methodischen Vorgehensweise. Diese soll das Vorgehen beim Einsatz des Digitalen Zwillings in der Planung und Durchführung des Ramp-downs beschreiben. Durch Fokussierung auf die Unterstützung bei produktionsnahen Entscheidungen soll die Methode die bestehenden betriebswirtschaftlichen Ansätze des Ramp-down Managements aus Produktionssicht ergänzen. Um den Ramp-down möglichst vollständig zu beschreiben, sollen daher Ansatzpunkte in den bestehenden, übergeordneten Ansätzen identifiziert werden, um den Einsatz der Digitalen Zwillinge in den betriebswirtschaftlichen Planungskontext einzuordnen

Die Zielstellung inklusive der beschriebenen Teilziele dienen dazu, die der vorliegenden Dissertation zugrundeliegende Forschungsthese zu überprüfen. Diese lautet:

Der Einsatz des Digitalen Zwillings in der Planung und Optimierung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme erschließt bisher ungenutzte Potentiale:

- **Genauere Planung und Durchführung eines effizienten Weiterbetriebs bestehender, automatisierter Produktionssysteme.**
- **Effiziente Planung der final notwendigen Rückbauszenarien, sobald der Weiterbetrieb des bestehenden, automatisierten Produktionssystem nicht mehr möglich ist.**

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Dissertation ist in acht Kapitel unterteilt. Ihre Struktur ist in Bild 1 dargestellt. Im ersten Kapitel werden die Motivation und die Zielsetzung dargelegt sowie die Vorgehensweise der Arbeit definiert.

Kapitel 2 stellt die relevanten Grundlagen und den Stand der Forschung im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme dar. Die Schwerpunkte liegen hierbei auf der Beschreibung automatisierter Produktionssysteme sowie bestehender Forschungsansätze im Ramp-down Management. Das Kapitel schließt mit einem kurzen Zwischenfazit, in dem die bestehenden Forschungsansätze verglichen und bewertet werden.

Kapitel 3 beschreibt den zweiten Themenkomplex der Arbeit, den Digitalen Zwilling automatisierter Produktionssysteme. Hierzu werden die Grundlagen zur ereignisdiskreten Materialflusssimulation und zum Digitalen Zwilling dargelegt. Hervorzuheben ist hierbei die Einführung des Digital Twin Structure Models (DTSM), anhand dessen die Ausführungen in Kapitel 5 gegliedert sind. Das Kapitel schließt mit einem Zwischenfazit ab.

In Kapitel 4 werden die zuvor ausgeführten Themengebiete des Ramp-downs und des Digitalen Zwillings zusammengeführt, indem auf Basis der Erkenntnisse des Standes der Wissenschaft und Technik der Handlungsbedarf der Arbeit abgeleitet wird. Des Weiteren wird der Forschungsbedarf anhand von Forschungsfragen an den Digitalen Zwilling automatisierter Produktionssysteme für die Planung und Durchführung des Ramp-downs sowie an die Methode für deren Einsatz konkretisiert.

Kapitel 5 beschreibt die Konzeption des simulationsbasierten Digitalen Zwillings auf Basis des DTSM. Hierbei werden die notwendigen Modelle sowie Funktionen des Digitalen Zwillings beschrieben. Besonderer Fokus

liegt hierbei auf der Implementierung der Ramp-down spezifischen Eigenschaften in das ereignisdiskrete Materialflusssimulationsmodell.

Neben der Beschreibung des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme für den Ramp-down bedarf es einer Methode für deren Einsatz. Diese wird in Kapitel 6 beschrieben. Zuerst wird die Methode DT4RampDown für den zielgerichteten Einsatz des in Kapitel 5 charakterisierten Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme konzipiert. Anschließend wird diese in die bestehenden, übergeordneten Ramp-down Managementansätze eingeordnet.

Die Methode DT4RampDown und der konzipierte Digitale Zwilling werden in Kapitel 7 anhand einer beispielhaften Implementierung validiert. Als Grundlage dient eine reale, variantenreiche, automatisierte Serienproduktion. Die Implementierung wird in einer Zusammenfassung in Bezug auf die in Kapitel 4 gestellten Forschungsfragen bewertet.

Die vorliegende Dissertation schließt mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel 8 ab. In der vorliegenden Dissertation wird zu Gunsten der besseren Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet, wobei stets alle Geschlechter gemeint sind.

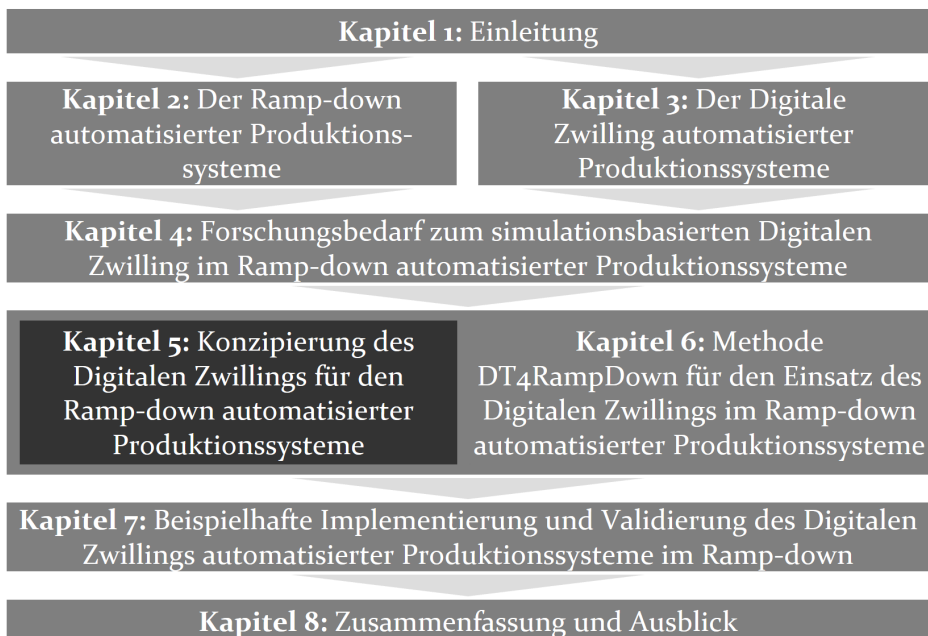


Bild 1: Aufbau der Arbeit

2 Der Ramp-down automatisierter Produktionssysteme

Die Erweiterung des Ramp-down Managements um den Einsatz des Digitalen Zwillings erfordert initial eine Beschreibung der zu untersuchenden automatisierten Produktionssysteme. Diese werden im Folgenden mit Fokus auf deren Lebenszyklus und den in den verschiedenen Phasen anfallenden Planungs- und Steuerungsaufgaben beschrieben. Anschließend werden der Ramp-down als zentraler Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Dissertation genauer charakterisiert und bestehende Managementansätze vorgestellt und systematisiert. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und Schlussfolgerung. Teile der folgenden Ausführungen sind an den vom Autor am Lehrstuhl FAPS betreuten studentischen Arbeiten [S1–S4] angelehnt.

2.1 Grundlagen automatisierter Produktionssysteme

Die Produktion ist ein transformierender Prozess zur Leistungserstellung [11]. Die hierfür notwendigen Produktionsprozesse werden übergeordneten Produktionssystemen zugeordnet, die auf Basis eines Inputs, wie zum Beispiel Material, Energie oder Wissen, durch den Einsatz ihrer zugrundeliegenden Elemente, wie zum Beispiel Maschinen oder Arbeiter, einen qualitativ höherwertigeren Output, wie zum Beispiel Zwischen- oder Endprodukte, generieren [12–16]. Dabei stehen Produktionssysteme aus betriebswirtschaftlicher Sicht stets im Spannungsfeld zwischen wirtschaftlichen, technischen, politischen, natürlichen, rechtlichen sowie sozio-kulturellen Faktoren [15].

In der Literatur existieren unterschiedliche Definitionen von Produktionssystemen [17]. So können Produktionssysteme nach DYCKHOFF aus einzelnen Arbeitsplätzen, Anlagen oder gar Werken und Baustellen bestehen [12]. NIEMANN und WESTKÄMPER hingegen ordnen Produktionssysteme in der Struktur der Fabrik ein [18]. Bild 2 zeigt die Einordnung des Produktionssystems unter der Ebene Produktionssegment, wobei ein Produktionssystem in mehrere Teilsysteme, sogenannte Produktionszellen unterteilt werden kann [12, 18]. Neben Unterschieden in der strukturellen Einordnung von Produktionssystemen variiert deren Funktionsumfang gemäß der ihrer Definition zugrundeliegenden Sichtweise. Während aus organisa-

torischer Sicht sämtliche Geschäftsprozesse zur Produktherstellung beachtet werden, besteht die technische Sicht aus der systemtechnischen Implementierung der Produktionsprozesse [17].

Der vorliegenden Dissertation wird die in Bild 2 dargestellte Einordnung zugrunde gelegt. Dementsprechend besteht ein Produktionssystem aus mehreren Produktionszellen und erzeugt durch die Transformation eines Inputs einen Output. Es steht dabei im Spannungsfeld verschiedener Umweltfaktoren, die Einfluss auf das Produktionssystem haben können.

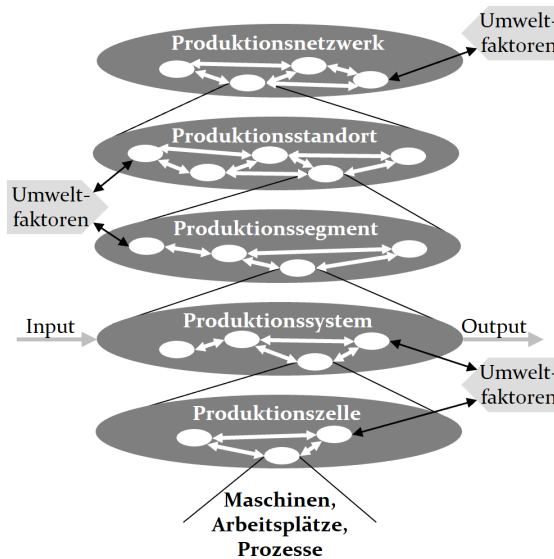


Bild 2: Einordnung des Produktionssystems in den Gesamtcontext der Produktion in Anlehnung an [12, 18]

Des Weiteren lassen sich Produktionssysteme anhand des Automatisierungsgrades der zugrundeliegenden Produktionsprozesse unterscheiden. Die Automatisierung ist nach WESTKÄMPER als „die reproduzierbare und selbständige Ausführung eines Prozesses durch eine Maschine nach einem vorbestimmten Ablauf“ definiert [19]. Automatisierte Produktionssysteme beinhalten demnach vorrangig automatisierte Produktionsprozesse zur Leistungserstellung. Der Mensch nimmt somit lediglich unterstützende Prozesse, wie die Materialbereitstellung, Wartung oder Rüstvorgänge, wahr. Der Fokus der vorliegenden Dissertation liegt auf dem Ramp-down automatisierter Produktionssysteme. Zu deren Einordnung werden im Folgenden der Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme sowie die Aufgaben der Produktionssystemplanung sowie PPS genauer erläutert.

2.1.1 Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme

Die Leistungserstellung findet durch die Herstellung von materiellen Gütern im Betrieb der Produktionssysteme statt [13]. Daher stellt dieser im Sinne der Wertschöpfung die primär wichtigste Phase im Lebenszyklus eines Produktionssystems dar [15]. Ermöglicht wird diese jedoch erst durch die ihm vorgelagerten Phasen des Lebenszyklus. Die einzelnen Phasen werden in einem Lebenszyklusmodell automatisierter Produktionssysteme in einen Kontext gebracht. Bild 3 zeigt das durch die Synthese von Lebenszyklusmodellen des Standes der Technik entstandene, vereinfachte Lebenszyklusmodell eines Produktionssystems anhand der Zielgröße Ausbringung. Dessen fünf Phasen werden im Folgenden genauer erläutert.

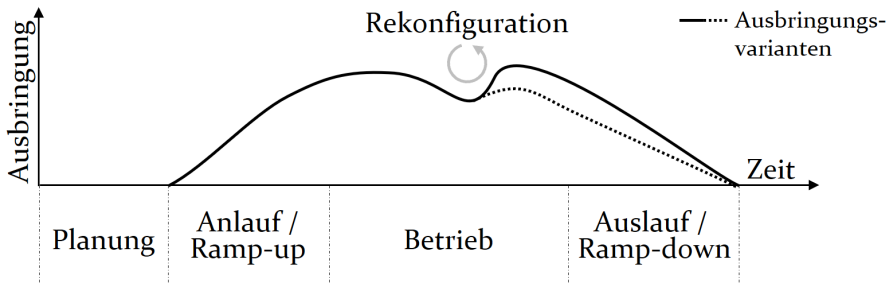


Bild 3: Vereinfachtes Lebenszyklusmodell von Produktionssystemen mit zwei unterschiedlichen Ausbringungsvarianten nach der Rekonfiguration in Anlehnung an [20, 21]

Für einen effizienten Betrieb ist die Planung des Produktionssystems entscheidend, da grundlegende Prozesse, Ressourcen und Strukturen festgelegt werden [17]. Sie stellt die erste Phase des Lebenszyklus dar. Wie bei der Entwicklung neuer Produkte erzeugt die Planungsphase von Produktionssystemen kontinuierlich Kosten [20, 22]. Die Überführung der Planung in den Betrieb findet nach dem Aufbau in der Phase des Anlaufs, auch Ramp-up oder Start-up genannt, statt. Diese beinhaltet nach der ersten Inbetriebnahme des Produktionssystems die Steigerung der Ausbringungsmenge durch die ständige Anpassung der Produktionsprozesse [17].

Durch den Beginn der Produktion und den Verkauf gefertigter Güter wird ein Produktumsatz generiert [23]. Der Break-Even-Point, ab dem Gewinne erzielt werden, erfolgt in der Betriebsphase [23]. Im Betrieb besteht die Hauptaufgabe aus der Aufrechterhaltung der Produktivität des Produktionssystems mittels der Durchführung der Aufgaben der PPS [24]. Dabei kann es aufgrund externer Faktoren oder gezielter Verbesserungsarbeit mehrfach zu Anpassungen bzw. Umplanungen am Produktionssystem, hier Rekonfigurationen genannt, kommen [17, 25]. Bei deren Implementierung können stillstandsbedingte Ausbringungsrückgänge auftreten. Je

nach Art der Rekonfiguration, wird das Ausbringungsniveau aus dem vorherigen Betrieb wieder erreicht oder sogar übertroffen (s. Ausbringungsvarianten nach Rekonfiguration in Bild 3). Gründe für Rekonfigurationen von Produktionssystemen können eine Erweiterung des zu produzierenden Produktportfolios des Produktionssystems oder eine Wiedereinführung des Produkts sein [21].

Der Lebenszyklus eines Produktionssystems beschließt mit dessen Abbau bzw. Auslauf, auch Ramp-down genannt [17]. Dieser beinhaltet die Beendigung der Produktion [20]. Der Ramp-down wird auf Grund seines Stellenwerts in der vorliegenden Dissertation in Kapitel 2.2 detailliert erläutert. Bei der Wiederverwendung des Produktionssystems in neuen Produktionsprojekten kann das vorgestellte Lebenszyklusmodell mehrfach durchlaufen werden.

2.1.2 Planung automatisierter Produktionssysteme

Gemäß Bild 3 stellt die Planung die erste Aufgabe im Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme dar. Die Neuplanung zeichnet sich durch den größten Freiheitsgrad im Planungsprozess aus und stellt eine der vier grundlegenden Planungsfälle dar [25]. Die drei weiteren definierten Planungsfälle sind die Umplanung (s. Rekonfiguration in Bild 3), der Rückbau und die Revitalisierung [25]. Diese beziehen sich grundsätzlich auf die Fabrikplanung, lassen sich jedoch auch auf Produktionssysteme anwenden, da diese einen Teil der Fabrik darstellen [18, 25]. Eine Übersicht verschiedener Vorgehensweisen zur Fabrikplanung ist in [26] beschrieben. Sie alle haben das Ziel, eine Fabrik von der ersten Idee bis zum Produktionshochlauf unter Zuhilfenahme von Methoden und Werkzeugen in systematischen, aufeinanderfolgenden Phasen zu planen [25, 26].

Bild 4 zeigt den Fabrikplanungsprozess aus der VDI RICHTLINIE 5200, wobei die für Produktionssysteme relevanten Planungsaufgaben hervorgehoben sind. Während in den Planungsphasen 1 und 2 Ziele sowie Arbeitspakete definiert und grundlegende Daten gesammelt und bereitgestellt werden, beinhalten die Konzept- und Detailplanung (Phasen 3 und 4) die für die Auslegung der Produktionssysteme relevanten Planungsaufgaben [25]. Diese werden auf Basis der Ergebnisse vorgelagerter Planungsphasen sequentiell oder iterativ durchgeführt [25]. Die Konzeptplanung liefert nach Durchlaufen der Strukturplanung, Dimensionierung, Ideal- und Realplanung ein realisierbares Konzept inklusive des Reallayouts [25]. Die spezifischen Planungsaufgaben zur Erstellung des Konzepts können Bild 4 entnommen werden.

Auf Basis des Groblayouts wird in Phase 4, der Feinplanung, ein Feinlayout mit ausdetailliertem Materialfluss, definierter Betriebsmittelanordnung und Arbeitsplatzgestaltung konzipiert [25, 26]. Für die verschiedenen Planungsaufgaben existieren eine Vielzahl an Vorgehensweisen und Werkzeugen, die in [17] und [26] genauer erläutert werden. Darüber hinaus können Simulationstechniken wie die ereignisdiskrete Materialflusssimulation in diversen Planungsaufgaben eingesetzt werden [27]. Deren Einsatzpotentiale werden in Unterkapitel 3.1.3 genauer beschrieben.

Dem Top-Down-Planungsansatz folgend, werden dabei die einzelnen Arbeitsplätze und Maschinen ausdetailliert [26]. Hierzu kann die Vorgehensweise zur Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme aus der VDI RICHTLINIE 2206 angewandt werden [28]. In den folgenden Planungsphasen 5-7 werden hauptsächlich organisatorische Planungsschritte für den Bau und den Hochlauf der Fabrik und somit auch der Produktionssysteme durchgeführt [25]. Da diese Planungsphasen keine Planungsaufgaben beinhalten, die direkte Anpassungen an der Ausgestaltung des Produktionssystems beeinflussen, wird auf diese nicht weiter eingegangen.

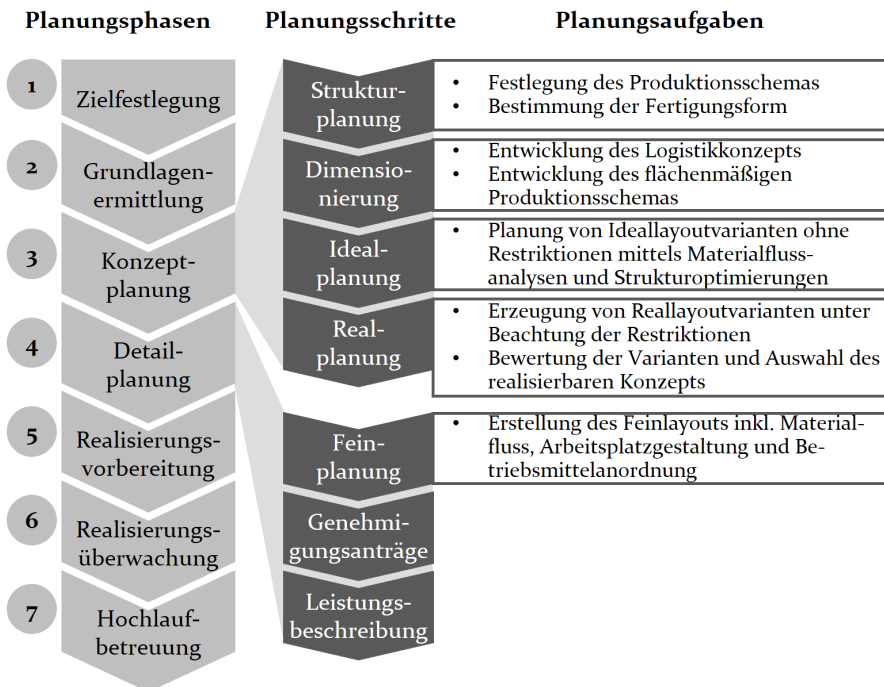


Bild 4: Für die Planung von Produktionssystemen relevante Planungsaufgaben im Kontext der Planungsphasen und -schritte der Fabrikplanung in Anlehnung an [25, 26]

2.1.3 Produktionsplanung und -steuerung automatisierter Produktionssysteme

Die Planung automatisierter Produktionssysteme endet gemäß den vorherigen Ausführungen mit der Hochlaufbetreuung (s. Bild 4). Dem Hochlauf bzw. Anlauf folgt im Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme deren Betrieb (s. Bild 3). Für einen möglichst reibungslosen Betrieb muss eine Vielzahl an Aufgaben gelöst werden. Diese werden unter dem Begriff PPS gesammelt. Die PPS wurde erstmals von HACKSTEIN als die Planung und Steuerung der Bereiche Konstruktion, Arbeitsvorbereitung, Beschaffung und Fertigung definiert [29]. Darauf aufbauend werden die zentralen Aufgaben der PPS systematisiert [29]. Mit der Weiterentwicklung der Produktion wurde der Begriff der PPS fortlaufend erweitert [30]. Das erweiterte Verständnis beinhaltet neben den vier ursprünglichen Produktionsbereichen auch den Vertrieb, den Einkauf sowie den Versand [31]. Die Ziele der PPS sind demnach: [13]

1. hohe Kapazitätsauslastung,
2. geringe Kapitalbindung,
3. niedrige Beschaffungskosten und
4. hohe Termintreue.

Diese stehen untereinander in teilweise konkurrierender Beziehung. So kann eine hohe Termintreue beispielsweise durch höhere Bestände, die jedoch eine höhere Kapitalbindung zur Folge haben, gewährleistet werden [29]. Ähnlich verhält es sich mit den anderen Zielen der PPS [13].

Um die Produktion dennoch möglichst effizient zu gestalten, wurden PPS-Modelle entwickelt, die Aufgaben und Funktionen der PPS systematisieren. Eines der am weitesten verbreiteten PPS-Modelle ist das Aachener PPS-Modell [31]. Bild 5 zeigt dieses in der Aufgabenreferenzsicht mit den für den Betrieb eines automatisierten Produktionssystems mit Eigenfertigung relevanten Kernaufgaben. Es besteht aus den unternehmensinternen Kernaufgaben der PPS, die innerbetriebliche Aspekte der PPS behandeln, den Netzwerkaufgaben, die überbetriebliche Elemente betreffen, den Querschnittsaufgaben, die Kern- und Netzwerkaufgaben ganzheitlich integrieren, sowie einer durchgängigen Datenverwaltung [32]. Da der Fokus auf innerbetrieblichen Produktionssystemen liegt, sind die Netzwerkaufgaben an dieser Stelle nicht weiter von Bedeutung. Detaillierte Erläuterungen zu den Querschnitts- sowie einzelnen Kernaufgaben inklusive bewährter Vorgehensweisen und Werkzeuge können den Grundlagewerken [29], [31], [33]

und [34] entnommen werden. Aufgaben und Funktionen der Datenverwaltung sowie Vorgehensweisen zur Auswahl und Einführung passender Systeme sind in [32] detailliert dargelegt.

Querschnittsaufgaben	Auftragsmanagement			Datenverwaltung
	Bestandsmanagement			
	Controlling			
Kernaufgaben	Produktionsprogrammplanung	Produktionsbedarfsplanung	Eigenfertigungsplanung/-steuerung	
	<ul style="list-style-type: none"> • Absatzplanung • Primärbedarfsplanung • Ressourcengrobplanung 	<ul style="list-style-type: none"> • Bruttosekundärbedarfsermittlung • Nettosekundärbedarfsermittlung • Beschaffungsartzuordnung • Durchlaufterminierung • Kapazitätsbedarfsermittlung • Kapazitätsabstimmung 	<ul style="list-style-type: none"> • Losgrößenrechnung • Feinterminierung • Ressourcenfeinplanung • Reihenfolgeplanung • Verfügbarkeitsprüfung • Auftragsfreigabe 	
Netzwerkaufgaben	Netzwerk-konfiguration	Netzwerk-absatzplanung	Netzwerk-bedarfsplanung	

Bild 5: Aufgabenreferenzsicht des Aachener PPS-Modells mit aufgeschlüsselten Kernaufgaben angepasst an automatisierte Produktionssysteme in Eigenfertigung in Anlehnung an [32]

Eine besondere Rolle für das operative Management des Betriebs automatisierter Produktionssysteme nehmen Kennzahlen (engl. Key Performance Indicator, KPI) ein. Diese bilden gleichzeitig die Grundlage für die Querschnittsaufgabe Controlling [32]. KPIs erlauben die quantitative Bewertung des Produktionsbetriebs und stellen gleichzeitig die Grundlage für die Bewertung der Planung dar [35]. Sie werden zumeist automatisiert über Manufacturing Execution Systems (MES) aufbereitet und anschließend bereitgestellt [36]. Zur besseren Vergleichbarkeit der Ausbringung, Nutzung und Qualität einzelner Maschinen und Produktionssysteme innerhalb eines Unternehmens sowie unternehmensübergreifend besteht ein Satz definierter KPIs, die dem VDMA-Einheitsblatt 66412-1 entnommen werden können [36].

2.2 Ramp-down Management

In Bild 3 wird der Ramp-down am Ende des Lebenszyklus im Bereich der sinkenden Nachfrage und Produktionsterminierung automatisierter Produktionssysteme verortet. Im Folgenden werden die Grundlagen der Phase des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme sowie dessen Management genauer erörtert. Darauf aufbauend wird der Stand der Forschung im Bereich des Ramp-down Managements dargelegt und bewertet.

2.2.1 Grundlagen des Ramp-downs

Der Ramp-down ist das begriffliche Pendant des Ramp-ups. So wie der Ramp-up das Hochfahren eines Produktionssystems beinhaltet, so fokussiert der Ramp-down stets dessen Herunterfahren bis zum Ende der Produktion. Neben dem Begriff des Ramp-downs gibt es eine Reihe weiterer Begrifflichkeiten, die für den gleichen oder ähnlichen Themenkomplex verwendet werden. Zu diesen gehören im deutschsprachigen Raum der „Auslauf“ [8] bezogen auf die Serie [37, 38] oder ein Produkt [39, 40] und der „Produktionsrückbau“ [40], sowie im englischsprachigen Raum „phase-out“ [41] und „run-out“ [42]. Auf Basis einer Gegenüberstellung der Definitionen besagter Begriffe zeigt WAGNER auf, dass in der bestehenden Literatur kein eindeutiges Verständnis vorliegt, sondern bestehende Definitionen entweder auf den Auslauf eines Produkts, die Auslaufphase im Produktlebenszyklus oder die Auslaufphase im Kontext des Produktionsendes fokussieren [6]. Auf Basis dessen unterscheidet Wagner deutlich zwischen „product phase-out“ und „production phase-out“ [6]. Letzterer wird wie folgt definiert:

„Production phase-out is a process that enables a company to terminate a item’s production at a certain plant. It starts with the definition stage after phase-out decision-making and ends with closing activities in the finalization stage after producing the last item. The product might remain part of the company’s portfolio.“ [6]

Demzufolge hängen Ramp-down, hier „production phase-out“, und Produktauslauf, hier „product phase-out“, nur bedingt zusammen. Vielmehr stellt der Produktauslauf nur einen möglichen Grund für den Ramp-down dar. Wie in Bild 6 dargestellt, ist der Transfer eines Produkts zu einem anderen Produktionssystem ein weiterer Grund für einen Ramp-down. Laut SCHAUMANN existieren fünf Gründe für die Produkteliminierung und den Produkttransfer [43]. Während die technologische Weiterentwicklung Produkte vom Markt verdrängen kann, so können auch sich ändernde wirt-

schaftliche oder staatliche Randbedingungen sowie neue Marktentwicklungen und lokale Beschaffungsprobleme eine Produkteliminierung oder einen Produkttransfer zur Folge haben [43].

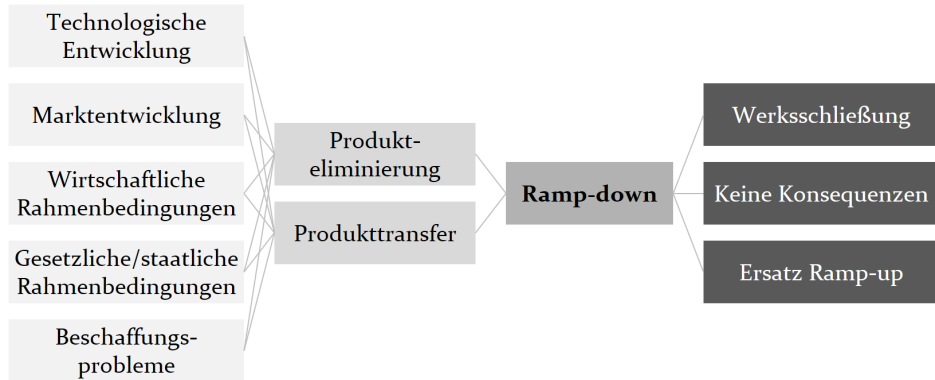


Bild 6: Gründe und Folgen eines Ramp-downs in Anlehnung an [6, 43]

Die Folgen eines Ramp-downs sind von Grund auf unterschiedlich. So stellt die Betriebs- bzw. Werksschließung eine mögliche Folge eines Ramp-downs dar [6]. Ein Ramp-down kann gleichzeitig keine Konsequenzen für das Produktionssystem haben, wenn gleichzeitig andere Produkte, die bereits im gleichen Produktionssystem gefertigt werden, die freigewordenen Kapazitäten einnehmen [6]. Die letzte Folge eines Ramp-downs stellt der Ramp-up eines anderen Produkts im gleichen Produktionssystem dar [6].

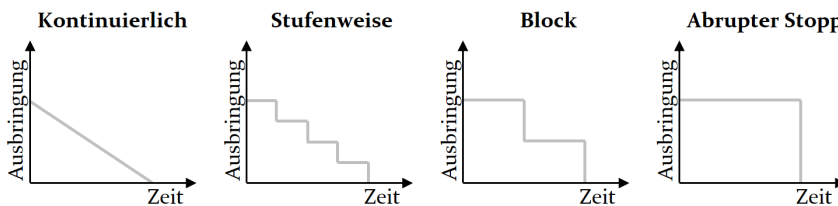


Bild 7: Ramp-down Strategien in Anlehnung an [6, 42, 44]

Die Strategien während des Ramp-downs und deren Umsetzung in der Produktion unterscheiden sich deutlich. Bild 7 zeigt die verschiedenen Ramp-down Strategien der Produktion. Die erste Strategie ist die kontinuierliche Absenkung des Produktionsvolumens, die sich beispielsweise durch die Reduktion von Bandgeschwindigkeiten realisieren lässt [6]. Bei einer stufenweisen Ausbringungsreduktion werden Produktionskapazitäten zu bestimmten Zeitpunkten gezielt reduziert [44]. Bei einer Blockstrategie wird die Produktion in zwei Schritten terminiert, indem beispielsweise eine von

zwei Produktionslinien vor der anderen heruntergefahren wird. Bei einem abrupten Stopp wird die gesamte Produktion auf einmal terminiert. [6]

Das in den vorhergehenden Absätzen dargestellte Verständnis des Produktionsauslaufs sowie der Begriff des Ramp-downs werden in der vorliegenden Dissertation als Grundlage verwendet. Folglich bezieht sich der Ramp-down stets auf das Herunterfahren der Produktion in einem Produktionssystem im Sinne eines „production phase-out“ nach WAGNER [6]: Der Ramp-down beginnt mit der Auslaufentscheidung des Managements. Er beinhaltet neben dem abschließenden Betrieb des Produktionssystems auch die notwendigen Rückbaumaßnahmen bis zum Ende der Produktion (engl. end of production, EOP). Ab diesem Zeitpunkt gilt der Ramp-down als abgeschlossen. Durch den Bezug auf das Produktionssystem wird die Lebenszyklusphase des Produkts zwischen EOP und Ende des Produktlebens (engl. end of life, EOL) nicht betrachtet.

2.2.2 Herausforderungen des Ramp-down Managements

Das Ramp-down Management, auch Auslaufmanagement genannt [39], lässt sich in eine Reihe mit dem Management der Produktentwicklung bzw. der Fabrikplanung, dem Management des Anlaufprozesses sowie dem Management der Serienproduktion einordnen [5]. Bild 8 zeigt diese Einordnung anhand des in Bild 3 eingeführten Lebenszyklusmodells für Produktionssysteme.

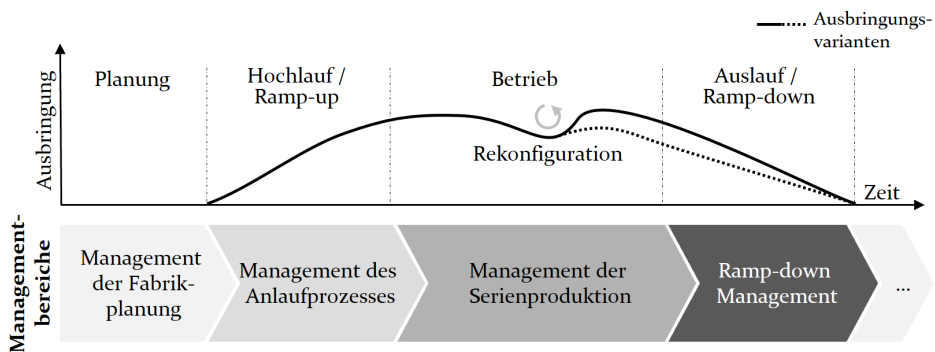


Bild 8: Einordnung des Ramp-down Managements in den Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme in Anlehnung an [5, 20, 21]

Das Ramp-down Management folgt demnach dem Management der Serienproduktion. Je nach Ausgang des Ramp-downs (s. Bild 6) kann das Management eines unmittelbaren Ramp-ups oder einer grundlegend neuen Planung des Produktionssystems folgen. Bei kompletter Stilllegung

des Produktionssystems stellt das Ramp-down Management den letzten Arbeitsinhalt des Produktionssystems vor dessen Verschrottung oder deren Recyclings dar.

Das Ramp-down Management ist, wie der Auslaufbegriff, nicht eindeutig definiert. Es existieren Beschreibungen aus Produkt- sowie Produktionssicht [39]. Darüber hinaus unterscheiden sich die Definitionen hinsichtlich der notwendigen Inhalte des Ramp-down Managements. Dennoch stehen sie alle vor den gleichen Herausforderungen. Diese sind in Bild 9 dargestellt. Dabei wird zwischen allgemeinen Herausforderungen und jenen mit direktem Produktionsbezug unterschieden.

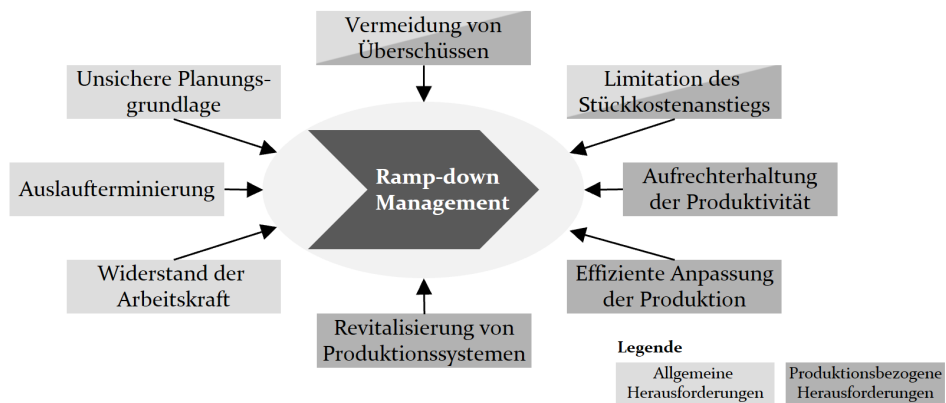


Bild 9: Herausforderungen des Ramp-down Managements auf Basis von [6, 37-40, 45-47]

Der Ramp-down charakterisiert sich, ausgehend von dessen Ursachen (s. Bild 6), durch seine unsichere Planungsgrundlage [45]. Eine der zentralen Herausforderungen des Ramp-down Managements aus Sicht des Produktes ist die Terminierung des Auslaufs, da in globalen Produktionsnetzwerken, wie sie in der Elektronik- oder Automobilbranche anzutreffen sind, unternehmensübergreifende Abstimmungen mit diversen Stakeholdern notwendig sind [46]. Während des gesamten Ramp-downs ist die Motivation der Mitarbeiter nicht zu vernachlässigen. Laut Untersuchungen von WAGNER ist der Widerstand der Arbeitskraft gegen die anstehenden Veränderungen eine der größten Herausforderungen im Ramp-down [6].

Mit Blick auf das Produktionssystem existieren weitere Herausforderungen. So gilt es, die Produktivität bei sinkenden Losgrößen möglichst aufrecht zu erhalten und somit einen produktionsbedingten Anstieg der Stückkosten zu limitieren [38, 40, 45]. Gleichzeitig müssen Überschüsse vermieden werden, da diese aufgrund fehlender Folgeaufträge gegebenenfalls nicht weiterverarbeitet oder gar verkauft werden können [37-39, 47].

Die unsichere Planungslage führt zu kurzfristigen, neuen Anforderungen an die Produktion, die sich möglichst effizient anpassen muss [45]. In Hinblick auf die Folgen eines Ramp-downs (s. Bild 6), ist die Revitalisierung einzelner Bestandteile des Produktionssystems für einen Neuanlauf eine zentrale Herausforderung für den nachhaltigen Einsatz des Produktionssystems [38, 45].

Gleichsam der Definition des Ramp-down Begriffs, bezieht sich das Ramp-down Management in der vorliegenden Dissertation auf die Produktion. Produktbezogene Fragestellungen, wie die genaue Auslaufterminierung, oder organisatorische Elemente, wie die Aufrechterhaltung der Mitarbeitermotivation, werden nicht betrachtet. Vielmehr liegt der Fokus auf der operativen Umsetzung des Ramp-downs sowie der Analyse dessen Auswirkungen innerhalb eines Produktionssystems.

2.2.3 **Bestehende Ansätze des Ramp-down Managements**

Zur Bewältigung der genannten Herausforderungen existieren bereits diverse Ansätze des Ramp-down Managements. Diese werden im Folgenden kurz vorgestellt sowie anhand den aus der Literatur abgeleiteten Kriterien charakterisiert:

- **K1 Zielobjekt:** Fokussiert der Managementansatz auf ein Produkt, ein Produktionssystem, ein Werk oder ein Produktionsnetz?
- **K2 Funktionale Perspektive:** Aus welcher funktionalen Perspektive (Produktion, Logistik, Marketing, Management, übergreifend) wird der Ramp-down betrachtet?
- **K3 Branche:** Aus welcher industriellen Branche stammt der Managementansatz?
- **K4 Implementierung:** Ist der Managementansatz bereits in der Praxis angewandt und validiert?

Die bestehenden Managementansätze sind gemäß ihres Veröffentlichungsdatums chronologisch angeordnet, wobei die Arbeiten eines Autors oder Autorenteam zusammengefasst werden. Bei der Beschreibung werden die spezifischen Begrifflichkeiten der jeweiligen Autoren für den Themenkomplex Ramp-down verwendet.

SCHAUMANN beschreibt in seiner Dissertation ein vierstufiges Vorgehen für eine systematische Produktauscheidung. Hierzu wird im ersten Schritt das bestehende Produktsortiment überwacht, wobei mit Hilfe von markt- und unternehmensorientierten Profilen eine Ausscheidungsmatrix abgeleitet wird, die die Identifikation kritischer Produkte ermöglicht. Im folgenden

Schritt werden die kritischen Produkte danach unterteilt, ob sie mit Hilfe weiterer Maßnahmen gerettet, das heißt wieder erfolgreich auf dem Markt platziert werden können oder ob sie aus dem Produktportfolio entnommen werden müssen. Der dritte Schritt beinhaltet die Prüfung des Ausscheidzeitpunkts der zuvor identifizierten kritischen Produkte. Die mit Hilfe dieses Vorgehens klassifizierten Produkte werden im abschließenden Schritt mit individuellen Maßnahmen realisiert. Hierzu werden Vorschläge für die verschiedenen Ausgangssituationen gegeben. Der Ansatz ist grundsätzlich branchenübergreifend sowie aus Sicht des Marketings für Produkte beschrieben. Eine Anwendung auf ein Industriebeispiel wird nicht genannt. [43]

HILL stellt eine mathematische Modellierung für die optimale Auffüllung des Materialbestands bei sinkender Produktnachfrage dar. Hierfür wird eine Reihe von Annahmen getroffen, die eine Modellierung der sinkenden Nachfrage als Potenzfunktion erlaubt. Unter diesen Randbedingungen lässt sich mit Hilfe der vorgestellten Methode ein optimaler Zeitplan für die Wiederauffüllung des Bestands definieren. Der Ansatz betrachtet dabei lediglich den Produktbestand, jedoch nicht dessen reale Umsetzung auf operativer Ebene. Es wird kein expliziter Branchenbezug genannt. Eine initiale Darstellung des Modells erfolgt anhand eines beispielhaften Parametersets. [48]

AVLONITIS ET AL. führen eine Studie mit 156 Produktausscheidungsszenarien aus dem Vereinten Königreich aus Sicht des Marketings durch. Dabei stellen sie zu Beginn wiederholt fest, dass die Produktausscheidung oder -ersetzung für die Entwicklung und den Hochlauf neuer Produkte von entscheidender betriebswirtschaftlicher Bedeutung ist. Dennoch bestehen bis zum damaligen Zeitpunkt, weder in der Industrie noch in der Forschung, keine vollständigen Vorgehensweisen für effiziente Produktausscheidungen. Die in der Studie aufgenommenen Produktausscheidungsszenarien werden anhand von produkt- und situationsbezogenen, unternehmens- und umweltbezogenen sowie produktausscheidungsspezifischen Variablen in sieben Cluster eingeordnet. Die Produktausscheidung wird in einem allgemeinen Prozess mit den Schritten Identifikation des ausscheidenden Produkts, Analyse und Revitalisierung, Bewertung und Entscheidungsfindung sowie Implementierung beschrieben. Für jedes der sieben Cluster wird hieraus ein spezifischer Prozess für die Produktausscheidung abgeleitet. Für die Umsetzung der Produktausscheidung werden keine weiteren Methoden oder Hilfsmittel genannt. Darüber hinaus werden keine weiteren Umsetzungen der vorgestellten Prozesse in der Industrie angeführt. [49]

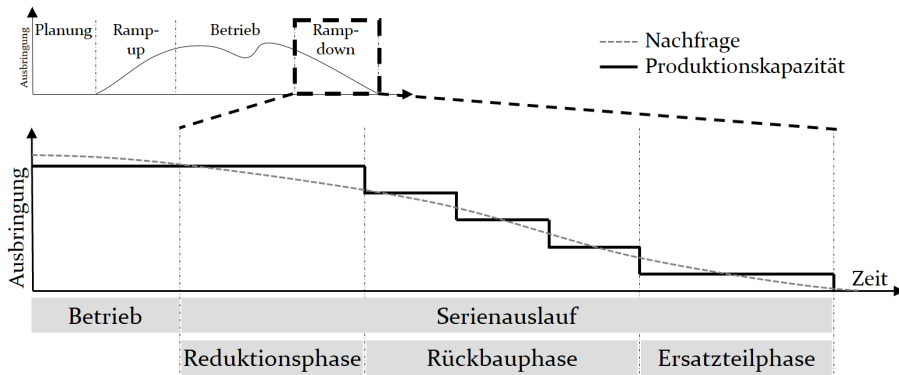


Bild 10: Verortung der Reduktions-, Rückbau- und Ersatzteilphase im Ramp-down von Produktionssystemen in Anlehnung an [20, 21, 37]

AURICH ET AL. nehmen sich der detaillierten Systematisierung des Serienauslaufs an. Dabei wird dieser in die Reduktionsphase, Rückbauphase und Ersatzteilphase unterteilt. Bild 10 zeigt diese anhand des Lebenszyklus von Produktionssystemen in Abhängigkeit der Produktionskapazität und Nachfrage. Der Serienauslauf beginnt mit der Reduktionsphase, bei der erstmals die Nachfrage die Produktionskapazität unterschreitet. Hierbei kann je nach Produktionssystem mit diversen Anpassungen der Produktionskapazität reagiert werden. Die Maßnahmen sind grundsätzlich nicht struktureller Natur, sondern stellen beispielsweise Umstellungen des Schichtsystems dar. [37, 42]

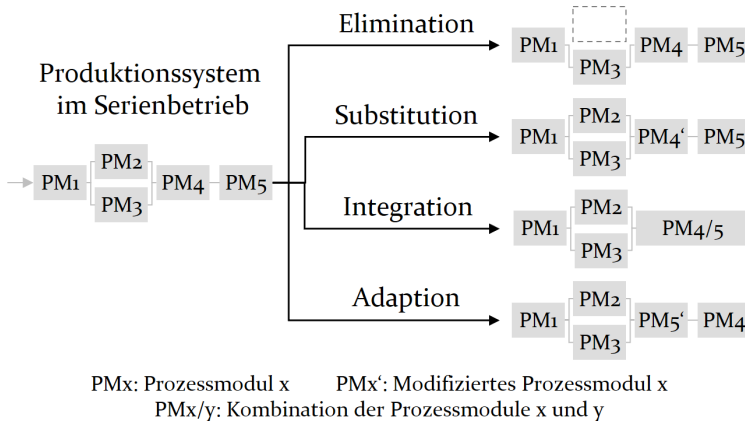


Bild 11: Schematische Darstellung der Rückbauprinzipien auf Ebene der Prozessmodule (PM) in Anlehnung an [37, 42]

Strukturelle Anpassungen des Produktionssystems erfolgen in der Rückbauphase. Hierfür werden vier Rückbauprinzipien genannt, die sich auf die

Prozessmodule (PM), funktionsfähige Elemente des Produktionssystems, beziehen. Diese sind in Bild 11 dargestellt. Die Elimination beschreibt die Entfernung einzelner paralleler bzw. redundanter PM. Unter Substitution wird das Austauschen einzelner PM durch PM, die eine geringere Produktionskapazität vorweisen, verstanden. Dies lässt sich für gewöhnlich durch die Senkung des Automatisierungsgrades realisieren. Das dritte Rückbauprinzip ist die Integration, bei der PM zusammengefasst werden. Das letzte Prinzip ist die Adaption, die die abschließende Anpassung des Produktionssystems an das neue zu fertigende Produkt beinhaltet. Diese strukturellen Änderungen können auch Teil einer Produktionsverlagerung in ein Rückbauwerk sein. Die Ersatzteilphase stellt das Ende des Serienauslaufs dar, bei der zu entscheiden ist, ob Ersatzteile einmalig produziert und zur Endbevorratung eingelagert werden oder ob eine bedarfsorientierte Nachproduktion angestrebt wird. [37, 42]

Für die Durchführung des Produktionsrückbaus stellen die Autoren einen dreistufigen Prozess mit den Schritten Rückbauplanung, Rückbaurealisierung und Revitalisierung auf. Anhand dieses Prozesses werden die für den Rückbau relevanten Aktivitäten aufgezeigt. Hervorzuheben ist der Fokus auf die Wiederverwendung bestehender PM in einem neuen Serienanlauf eines Produkts, der durch die explizite Planung der Revitalisierung deutlich wird. Für die praktische Durchführung des Rückbauprozesses wird ein Kapazitätskalender für den Serienauslauf vorgestellt. Dieser erlaubt die Planung und Dimensionierung des Rückbauprozesses. Eine praktische Validierung der Vorgehensweise wird nicht beschrieben. [37, 42]

In einem weiteren Beitrag stellen AURICH ET AL. ein methodisches Vorgehen zur Identifikation und Umsetzung von Flexibilitätsbedarfen bei Serienausläufen in der Produktion dar. Grundlage hierfür ist die in PM aufgebaute Struktur des Produktionssystems, die eine Wiederverwendung einzelner PM in parallel zum Serienauslauf stattfindenden Serienanläufen ermöglicht. Für die Identifikation und Umsetzung der Flexibilitätsbedarfe stellen die Autoren ein vierstufiges Verfahren vor. Beginnend mit der Identifikation von Flexibilisierungspotentialen und Änderungsbedarfen werden mit Hilfe einer Flexibility Mode and Effect Analysis (FlexMEA) existierende und potentielle Einflussfaktoren identifiziert und deren Auswirkung auf die Flexibilität des Produktionssystems dargestellt. Mit Hilfe des hierbei berechneten Flexibilitätsprioritätsindex können Maßnahmen der Flexibilitätsoptimierung für die relevanten PM geplant werden. Dem folgt die Ableitung von Änderungsbedarfen, wobei die zu verändernden Elemente des Produktionssystems identifiziert werden. Im dritten Schritt des Vorge-

hensmodells werden die Auswirkungen potentieller Änderungsmaßnahmen der einzelnen Elemente des Produktionssystems untereinander identifiziert. Dies wird anhand einer vorgestellten Änderungsmatrix durchgeführt, die die Verknüpfungen der Elemente beinhaltet. Der letzte Schritt beinhaltet die Gruppierung der Änderungsmaßnahmen gemäß ihren ähnlichen Auswirkungen sowie deren Umsetzung anhand eines Projektplans. Eine praktische Validierung des Vorgehensmodells wird nicht vorgestellt. [38]

HARJES beschreibt das Auslaufmanagement aus Sicht der Automobilindustrie. Hierin spiegelt sich das allgemeine Problem des bestehenden Auslaufmanagements wider: träge, nicht weit genug entwickelte Steuerungsmechanismen, die auf schnell ändernde Umwelteinflüsse nicht reagieren können. Um dem entgegenzuwirken, wird eine Softwarelösung eingeführt, mit deren Hilfe Schwankungen und Anpassungen des Mengengerüsts im Serienauslauf angezeigt werden können. Durch den Einsatz der Software in einem industriellen Anwendungsfall konnten neben der Reduktion von Beständen die Verschrottungskosten zu viel produzierter Bauteile deutlich gesenkt werden. Die Funktionsweise der Softwarelösung wird nicht weiter beschrieben, weshalb eingesetzte Methoden und Hilfsmittel nicht spezifizierbar sind. [50]

SCHMÖLZER und SCHÖFER beschreiben in ihrem Beitrag „Den Rest will keiner haben“ den Einfluss schlecht oder nicht geplanter Produktausläufe auf produzierende Unternehmen in der Automobilzuliefererindustrie. Dabei identifizieren sie fehlende Informationsbeschaffung, Kommunikation und Informationsverarbeitung als die zentralen Ursachen für ungenügend geplante Ausläufe. Gerade in der Zuliefererindustrie verstärkt sich der Effekt durch weitere zu involvierende Parteien deutlich, wodurch Restbestände nicht mehr einsetzbarer Komponenten in den Lagern der Zulieferer keine Seltenheit sind. Um dem entgegenzuwirken, stellen sie ein Vorgehensmodell bestehend aus fünf Schritten vor: Der Auslauferkennung, dem ersten Schritt, folgt eine detaillierte Analyse des Status des relevanten Produkts. Auf Basis dieser Datengrundlage wird ein Auslaufplan erstellt, der anschließend umgesetzt werden soll. Den letzten Schritt stellt das Monitoring des Auslaufprozesses bis zum EOL des Produkts dar. Hierbei zeigen die Autoren auf, dass ein Produkt mehrere Ausläufe durchleben kann. Zum einen stellt der Wechsel von der Serienproduktion hin zur Ersatzteilproduktion einen Auslauf dar. Zum anderen ist der Wechsel von letzterer zum EOL ein weiterer Auslauf. Zur Durchführung dieses Vorgehens schlagen sie die Visualisierung der verschiedenen Rollen der Unternehmensbereiche in einer

Verantwortlichkeitsmatrix vor. Für das Vorgehensmodell relevante Bereiche sind hierbei der Einkauf, die Produktion, der Vertrieb, das Key Account Management, die Logistik, das Auslaufmanagement und das Änderungsmanagement. Bei der Rollenverteilung wird zwischen Verantwortung, Mitwirkung und Informationsverteilung unterschieden. Anhand einer beispielhaften Rollenaufteilung wird deutlich gemacht, dass eine enge Zusammenarbeit der Bereiche mit dem Auslaufmanagement für eine gute Auslaufplanung essenziell ist. Das beschriebene Vorgehensmodell soll Unternehmen dazu befähigen, Produktausläufe frühzeitig zu erkennen und umzusetzen. Eine praktische Validierung des Vorgehens wird nicht genannt. [7]

KIRSCH ET AL. betrachten das Zusammenspiel von Serienanlauf und -auslauf aus Sicht der Logistik. Dabei wird die Auslaufphase in den Produktionsrücklauf und einen optionalen Auslaufblock aufgeteilt. Serienanlauf und -auslauf sind die Folge eines Produktwechsels. Für die dabei auftretenden Probleme identifizieren die Autoren fünf Hauptursachen. Zum einen fehlen Standardprozesse und -dokumente für die Durchführung des Serienanlaufs und -auslaufs. Eine weitere Ursache stellen verspätete Konstruktionsänderungen dar, die während des Anlaufs auftreten und einen erhöhten Kommunikationsaufwand sowie zunehmende Bestände nicht nutzbarer Teile verursachen. Darüber hinaus ist das Fehlen definierter interner und externer Kommunikation Hauptursachen. Als letzte Ursache wird die Einbindung der Mitarbeiter in das Tagesgeschäft und die dadurch fehlende Kapazität für den Serienanlauf und -auslauf genannt. Diesen Ursachen soll mit Hilfe von vier Optimierungsmethoden entgegengewirkt werden. So müssen die interne sowie externe Kommunikation durch definierte Schnittstellen transparenter und effizienter gestaltet werden. Des Weiteren ermöglicht die Standardisierung der Anlauf- und Auslaufprozesse im Zusammenspiel mit einer geeigneten IT-Infrastruktur eine erfolgreiche Durchführung des Produktwechsels. Für die Umsetzung der theoretischen Optimierungsmethoden in einem praktischen Anwendungsfall fehlt allerdings ein Vorgehensmodell. Darüber hinaus wird keine industrielle Anwendung der Optimierungsmethoden vorgestellt. [47]

OSTERTAG entwickelt ein Koordinationsmodell für die Supply-Chain-Koordination im Auslauf von Produkten in der Automobilindustrie. Hierfür werden Fortschrittszahlen, deren Anwendung für gewöhnlich in den Aufgaben der PPS liegen, auf eine Supply-Chain bestehend aus zwei sequenziell angeordneten Lieferanten und einem Endkunden angewandt. Das Modell berücksichtigt hierbei Supply-Chain spezifische Besonderheiten wie

Abnahmeverpflichtungen zwischen verschiedenen Parteien sowie anfallende Verschrottungskosten. Das vorgestellte Koordinationsmodell wird anhand einer Simulationsstudie bewertet, in der eine beispielhafte Supply-Chain mit Realdaten abgebildet wird. Die Simulationsumgebung setzt sich aus einer Datenbank sowie aus selbstentwickelten Algorithmen in der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA) zusammen. Die Ergebnisse zeigen, dass das Koordinationsmodell in der Auslaufphase zur Verbesserung beitragen kann. Im Speziellen lassen sich Zeitersparnisse realisieren sowie Verschrottungskosten reduzieren. [8]

SCHOLZ-REITER ET AL. entwickeln erstmalig fünf für den Auslauf spezifizierte Kennzahlen in der Automobilindustrie. Diese ermöglichen das Controlling des Auslaufs und steigern die gesamte Transparenz der Prozesse. Die erste Kennzahl beschreibt den Grad der Lieferantenintegration im Auslaufprozess. Sie dient der Quantifizierung der ständigen Abstimmung zwischen dem Unternehmen und den Lieferanten. Die Kennzahlen zwei und drei fokussieren Abweichungen im Produktionsprogramm und Produktänderungen während des Auslaufs. Beide steigern die Transparenz der dynamischen Änderungen und eröffnen durch deren frühzeitige Identifikation Kosteneinsparungspotentiale. Kennzahl vier, die Überschusskostenquote, dient zur Erfassung der Überschusskosten und steigert damit die Transparenz der Auslaufkosten. Die letzte Kennzahl ist der absolute Bedarf des Auslaufteils, wodurch dessen Überbestand oder Mangel identifiziert werden kann. Die Kennzahlen sind Ergebnis einer Untersuchung mit einem großen deutschen Automobilhersteller, weshalb eine praktische Umsetzung naheliegt, jedoch nicht genannt wird. Des Weiteren werden keine expliziten Hilfsmittel zur Erfassung und Überwachung der Kennzahlen angeführt. [40]

BUTLER ET AL. untersuchen das Vorgehen bei Fabrikschließungen als einer der möglichen Folgen des Ramp-downs (s. Bild 6). Hierzu wird eine reale Werksschließung in der Automobilbranche analysiert. Die Studie erfolgt aus Sicht des operationalen Managements sowie aus Sicht des Personalmanagements. Im Fokus stehen die Reaktionen der Mitarbeiter nach Verkündung der Werksschließung, die in deren Effektivität gemessen wird. Zur Datenaufnahme werden insgesamt zwölf Interviews mit Managern, Produktionsmitarbeitern und einem Gewerkschafter durchgeführt. Die Autoren stellen die Ergebnisse der Studie in einem verallgemeinerten Prozessmodell dar. Dieses enthält fünf zentrale Aktivitäten, die bei einer Werkschließung durchgeführt werden müssen. Das Prozessmodell beginnt mit dem gezielten Management des Markennamens und -verhältnissen, um

diese im Zuge der Werksschließung zu schützen. Die Planung der Ankündigung der Werksschließung sowie die Vision zur Werksschließung lassen sich mit ständigen Fortschrittsberichten zur zweiten Aktivität, dem Kommunikationsmanagement, zusammenfassen. Der nächste Schritt, das Schließungsmanagement, beinhaltet die Erstellung des Produktionsplans für die Schließung. Darüber hinaus werden der Schließungsplan und dazugehörige Aufgaben durchgeführt. Um die Mitarbeiter nach der Schließung in anderen Aufgaben an neuen Orten einsetzen zu können, ist Schritt vier, das Management der Investitionen in das Personal, die Beratung, Schulung und Ausbildung der Mitarbeiter gewidmet. Die letzte Werksschließungsaktivität stellt das Management der Betriebskontinuität dar. Da das Modell auf Basis einer einzelnen Studie basiert, ist es nicht allgemeingültig. Weitere Empfehlungen für die Durchführung der Schritte des Prozessmodells werden nicht gegeben. [51]

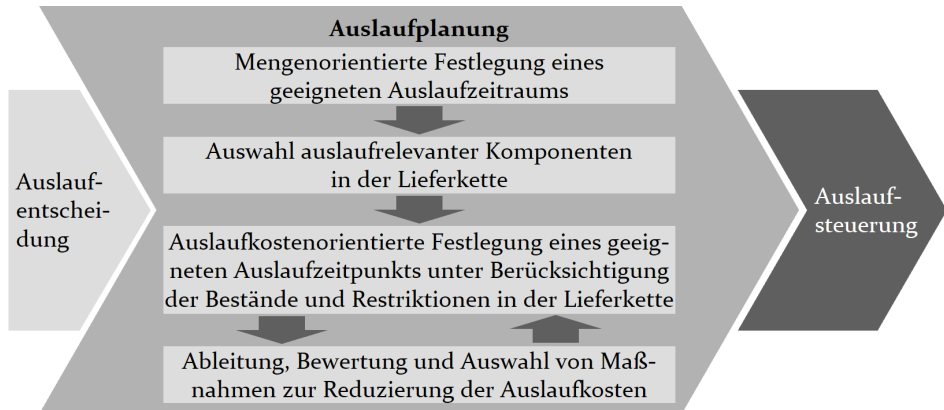


Bild 12: Vorgehen der Auslaufplanung für die Terminierung des Produktauslaufs in Lieferketten in Anlehnung an [46]

HERTRAMPF und NYHUIS betrachten Produktausläufe in Lieferketten der Elektronikindustrie. Hierbei identifizieren sie die Bestimmung des optimalen Zeitpunkts des Produktauslaufs als zentrale Aufgabe, da dieser Einfluss auf die Größe der Restbestände und somit die Kosten des Auslaufs hat. Bei Betrachtung gesamter Lieferketten verstärkt sich dieser Effekt deutlich. Daher stellen sie eine Vorgehensweise für die Terminierung des Produktauslaufs in der Auslaufplanung vor. Bild 12 zeigt die vier Schritte der Auslaufplanung im Kontext der Auslaufentscheidung und Auslaufsteuerung. Während die mengenorientierte Festlegung eines geeigneten Auslaufzeitraums und die Auswahl der auslaufrelevanten Komponenten sequenziell erfolgen, werden die anschließende auslaufkostenorientierte

Festlegung eines geeigneten Auslaufzeitpunkts und die Maßnahmenerstellung iterativ durchlaufen. Über das gesamte Vorgehen hinweg werden Fortschrittszahlen als Hilfsmittel verwendet. Sie dienen der Produktions- und Liefermengenplanung sowie der Bestimmung der finalen Auslaufkosten. Das Vorgehen wird beispielhaft aufgezeigt, wobei eine Validierung anhand eines realen Anwendungsfalls nicht beschrieben wird. [46]

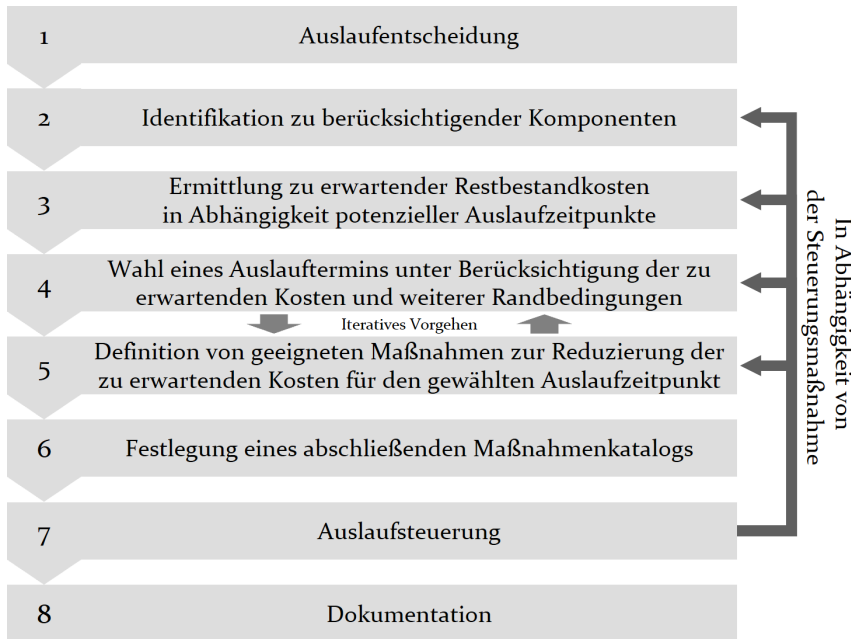


Bild 13: 8-Phasenmodell des Auslaufreferenzprozesses in Anlehnung an [52]

HOLTSCHE beschreibt in seiner Dissertation eine Methode für die Planung und Steuerung von Produktionsausläufen in der Elektronikindustrie. Dabei stehen Produkte im Vordergrund, die aufgrund ihrer in der Elektronikindustrie üblichen Baugruppenstruktur eine Vielzahl einzelner Komponenten beinhalten. Das übergeordnete Ziel des in Bild 13 dargestellten Phasenmodells ist die Identifikation des optimalen Auslaufzeitpunkts durch Betrachtung der logistischen Kenngrößen eines Unternehmens. Einige Bestandteile des Modells ähneln dem Ansatz zur Auslaufplanung von HERTRAMPF UND NYHUIS (s. Bild 12). Bei der Durchführung der in Bild 13 dargestellten Phasen kommen Lagerdurchlaufdiagramme sowie ein Auslaufkubus zum Einsatz. Der Auslaufkubus erlaubt hierbei die Einordnung einzelner Artikel in einem dreidimensionalen Raum, um deren Auslaufrelevanz darzustellen. Darüber hinaus wird für die Anwendung des Phasenmodells bei parallelen Mehrfachausläufen ein Vorgehensmodell vorgeschlagen. Der Autor zeigt die Schnittstellen der Auslaufplanung und

-steuerung mit der PPS im Aachener PPS-Modell auf, wobei die Produktionsprogrammplanung als zentrales Element identifiziert wird. Aus organisatorischer Sicht wird eine Eingliederung der Auslaufplanung und -steuerung als Projektorganisation in Form einer Matrix- oder Linienorganisationsstruktur vorgeschlagen. Das vorgestellte Phasenmodell wird anhand eines Industriebeispiels validiert. Dabei wird eine Kostenreduktion im Auslauf von 75% erreicht. [52]

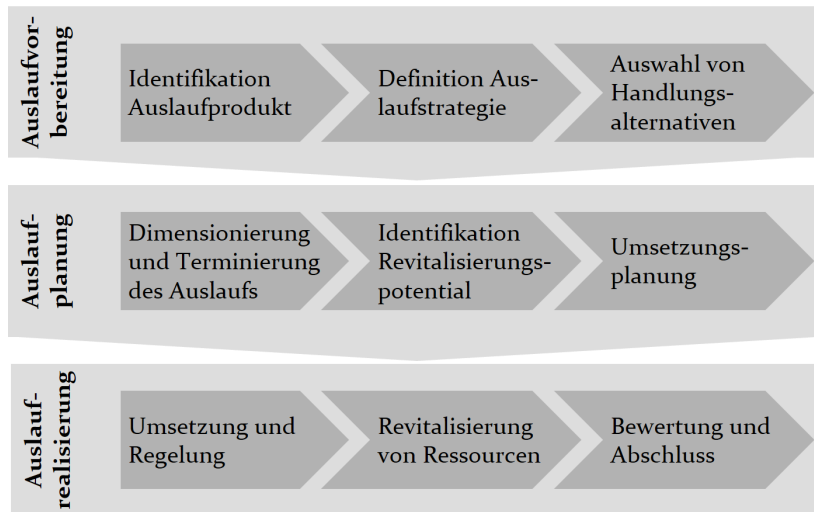


Bild 14: Anwendungsmodell des Serienauslaufs in der Produktion in Anlehnung an [45]

NAAB stellt ein Konzept für die Abwicklung des Serienauslaufs in der Produktion vor. Dieses beinhaltet ein Referenzmodell, in dem alle für den Serienauslauf relevanten Elemente (Markt, Produkt, Auslaufstrategie und -prozess, etc.) in einem Objektmodell klassifiziert werden. Dieses wird durch ein Prozessmodell ergänzt, das die Schritte Auslaufvorbereitung, Auslaufplanung und Auslaufrealisierung beinhaltet. Das Referenz- und Prozessmodell werden durch das in Bild 14 dargestellte Anwendungsmodell konkretisiert, das die Grundlage für die praktische Umsetzung des Serienauslaufs bildet. So werden zu Beginn in der Auslaufvorbereitung das Auslaufprodukt identifiziert und die Auslaufstrategie sowie Handlungsalternativen festgelegt. Anhand vorgestellter Kriterien lassen sich für den Anwendungsfall passende Auslaufstrategien auswählen. Zu diesen gehören der radikale Produktionsstopp mit oder ohne Anlauf eines Nachfolgeprodukts sowie gleitende Produktausläufe mit oder ohne Nachfolgeprodukte (s. Bild 7). Die Handlungsalternativen der Rückbauprinzipien (s. Bild 11) werden den Auslaufstrategien zugeordnet. Nach deren Festlegung beginnt die Aus-

laufplanung mit der Auslaufterminierung. Des Weiteren werden Revitalisierungspotentiale identifiziert und die Umsetzung geplant. Der letzte Schritt, die Auslaufrealisierung, beinhaltet die eigentliche Umsetzung des Serienauslaufs inklusive der Revitalisierung der ausgewählten Ressourcen sowie der Bewertung des Serienauslaufs. Das vorgestellte Konzept wird anhand einer beispielhaften Anwendung aus der Automobilzuliefererindustrie validiert. [45]

ELBERT beleuchtet das Erfordernis einer Eingliederung des Auslaufmanagements in den Produktlebenszyklus und fokussiert dabei das Logistikmanagement. Als Grundlage ihrer Untersuchung dient die Analyse der Auslaufphase mit Hilfe der Theorie der Pfadabhängigkeit. Hierbei werden die Entscheidungsprozesse des Auslaufmanagements auf deren Pfadabhängigkeit untersucht. Auf Basis dessen wird mittels einer Fallstudie das Auslaufmanagement eines Unternehmens der Automobilbranche analysiert. Aus dieser lassen sich folgende fünf Gestaltungsempfehlungen für das Auslaufmanagement ableiten: Die Erweiterung des Prozessbewusstseins, die Bildung funktions- und bereichsübergreifender Auslaufmanagement-Teams, die unternehmensübergreifende Koordinations- und Steuerungsfunktion, die Ausweitung der Projektkostenabrechnung und die Definition von Kennzahlen. Die Gestaltungsempfehlungen sind nicht allgemein übertragbar, da sie auf lediglich einer Fallstudie beruhen. Für die Durchführung des Auslaufmanagements werden weder ein Vorgehensmodell noch Hilfsmittel vorgestellt. Eine weitere praktische Validierung der zu erwartenden Verbesserung des Auslaufmanagements bei Beachtung der Gestaltungsempfehlungen wird nicht vorgestellt. [53]

HERTRAMPF betrachtet das Auslaufmanagement ganzer Produktionsnetze und entwickelt für das unternehmensübergreifende Auslaufmanagement ein Konzept bestehend aus den vier Phasen Vorbereitung, Informationsbereitstellung, PPS sowie Monitoring und Controlling. Die Vorbereitung beinhaltet die Modellierung des Produktionsnetzes inklusive der Festlegung der Kontrollblöcke und Parameter für die spätere Untersuchung mittels Fortschrittszahlen. In der Phase der Informationsbereitstellung werden Soll-Fortschrittszahlen im Produktionsnetz bestimmt sowie die Informationen im Produktionsnetz geteilt. Die Losgrößenplanung stellt den zentralen Arbeitsschritt der Phase PPS dar. Hierfür hat HERTRAMPF die Andlersche Losgrößenformel für den unternehmensübergreifenden Einsatz bei schwankenden Bedarfen erweitert. In der finalen Phase des Monitorings und Controllings werden die Fortschrittszahlen visualisiert und der Planungszustand mit dem Ist-Zustand kontinuierlich verglichen. Abschie-

ßend werden die Auslaufkosten ermittelt. Das Konzept wird in einem industriellen Anwendungsfall angewandt, wobei die Losgrößenplanung zeigt, dass die optimalen Losgrößen im Produktionsnetz während des Serienauslaufs sinken. Aufgrund des geringen Informationsbedarfs einzelner Parteien des Produktionsnetzes ist davon auszugehen, dass der Ansatz vergleichsweise einfach in der Praxis anwendbar ist. [39]

GRUSSENMEYER ET AL. untersuchen den Serienauslauf bei Werksschließungen mit dem Ziel, Standardprozesse zu identifizieren, um Ineffizienz im Serienauslauf zu vermeiden. Hierzu werden acht Interviews mit Experten im Bereich des Auslaufmanagements deutscher Unternehmen aus verschiedenen Branchen durchgeführt. Auf Basis derer wird ein Prozessmodell für die Durchführung von Serienausläufen bei Werksschließungen vorgestellt. Dieses beinhaltet die Schritte Planung, Realisierung, Steuerung und Finalisierung. Die zugrundeliegende Auslaufentscheidung wird dabei nicht betrachtet, sondern als vorangehender Meilenstein verstanden. Das Prozessmodell beschreibt eine Vielzahl an Tätigkeiten in den einzelnen Schritten, die in die Bereiche Arbeit, Maschine, Material und Management gegliedert werden. Da Werksschließungen von rechtlichen Rahmenbedingungen des jeweiligen Landes beeinflusst sein können, lässt die Untersuchung von lediglich deutschen Unternehmen keine Verallgemeinerung des Prozessmodells auf andere Länder zu. Eine Umsetzung der aus Interviews und Literatur zusammengestellten Tätigkeiten des Prozessmodells in einem neuen industriellen Anwendungsfall wird nicht vorgestellt. [41]

WAGNER widmet ihre Dissertation der Untersuchung der Einflussfaktoren und Werkzeuge für einen erfolgreichen Serienauslauf. Auf Basis einer weitreichenden Literaturrecherche sowie Interviews mit 26 Teilnehmern produzierender Unternehmen, die einen Serienauslauf betreut haben, wird das in Bild 15 dargestellte generische Prozessmodell entwickelt. Es beinhaltet notwendige und freiwillige Aktivitäten für die Durchführung eines Auslaufs. Diese werden anhand der Schritte Definition, Planung, Implementierung und Finalisierung sowie der Dimensionen Management, Arbeit, Anlagen- und Betriebskapital eingeordnet. Die Auswertung der Interviews erlaubt darüber hinaus neue Einblicke in die praktische Umsetzung und Relevanz eines standardisierten Managements des Serienauslaufs. Um die Potentiale in dessen Umsetzung auszuschöpfen, erweitert WAGNER das Aachener PPS-Modell (s. Bild 5) um auslaufspezifische Aufgaben. Hierbei stehen die Reduktion der Restbestandkosten und die Sicherung der Ersatzteilversorgung im Fokus. Die prototypische Anwendung erfolgt in einem

Microsoft Excel basierten Demonstrator im Zuge eines Workshops. Die Anwendung des Prozessmodells in einem industriellen Anwendungsfall bleibt offen. [6, 54]

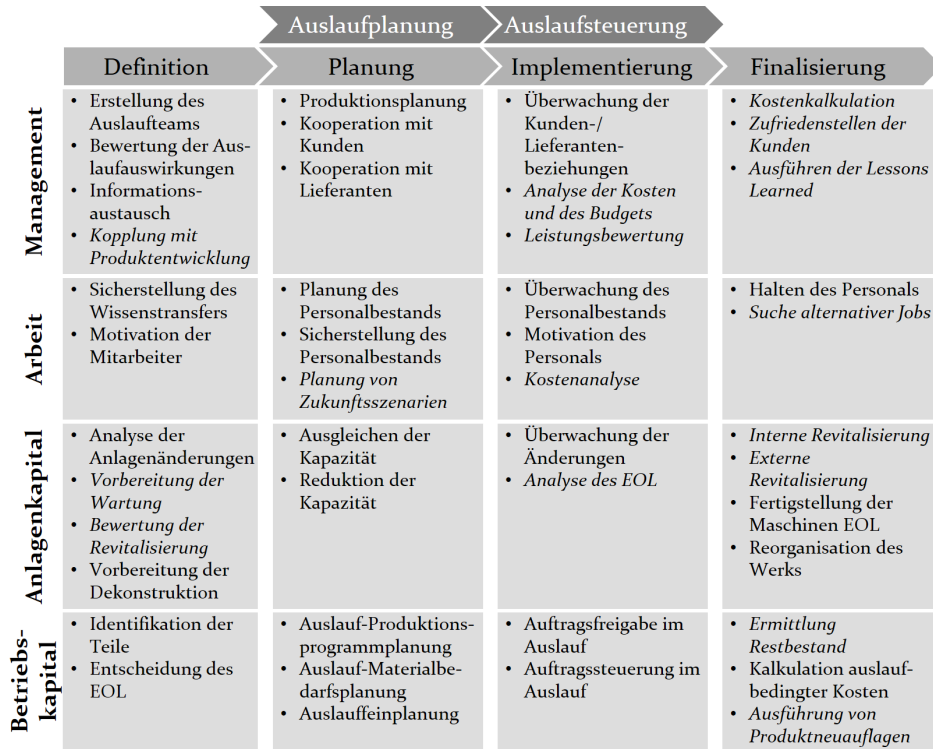


Bild 15: Generisches Prozessmodell zur Abwicklung von Ausläufen mit freiwilligen Aktivitäten in *kursiv* in Anlehnung an [6]

2.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Wie aus den Ausführungen im vorhergehenden Kapitel deutlich wird, bestehen zwar Ansätze für das Ramp-down Management, jedoch erfahren diese forschungsseitig weitaus geringere Aufmerksamkeit als das Ramp-up Management. Die Gründe hierfür sind vielseitig, so liegt es in der menschlichen Natur, dass das Schaffen von Neuem mehr Freude bereitet als das Verabschieden von lange Bekanntem [43]. In Bild 16 sind die 18 zuvor vorgestellten Ansätze anhand der Kriterien K1-K4 in chronologischer Reihenfolge gelistet. Des Weiteren sind die Ausprägungen der einzelnen Kriterien anhand ihrer Häufigkeit visualisiert.

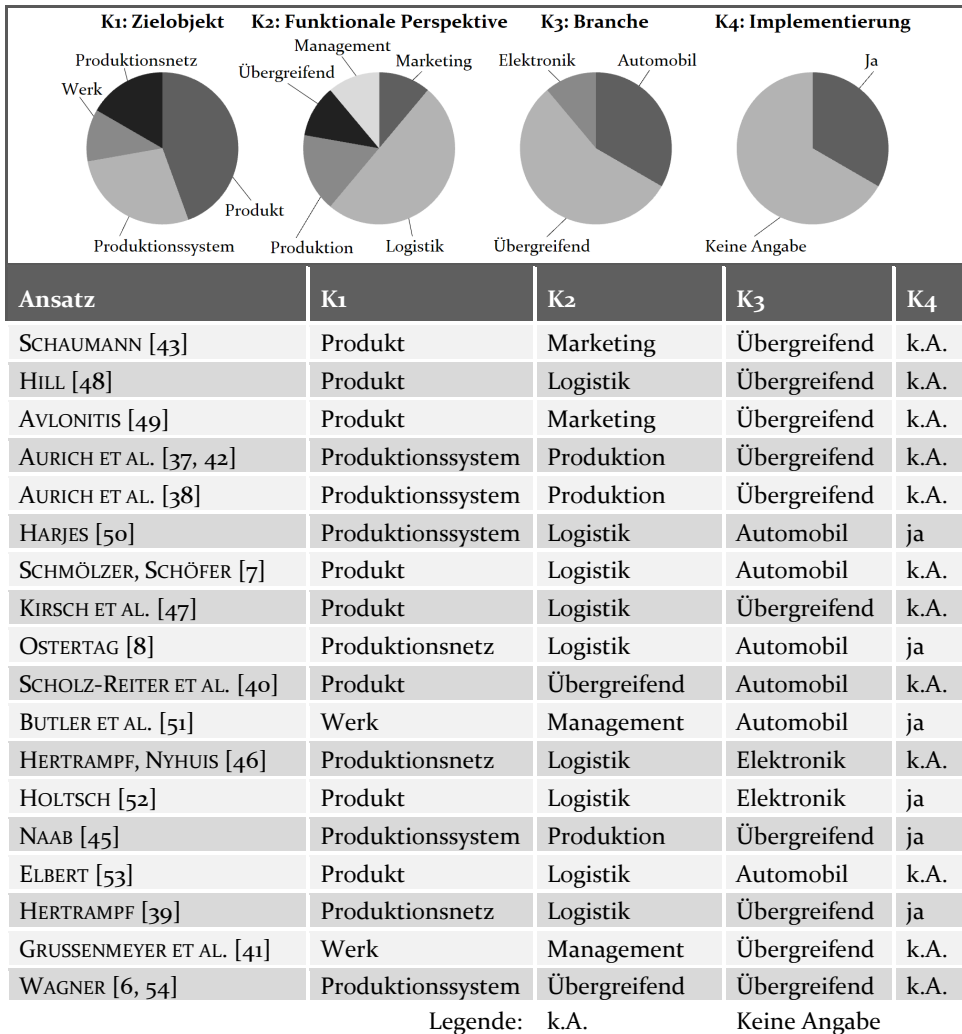


Bild 16: Gegenüberstellung bestehender Ramp-down Managementansätze anhand der Kriterien K1-K4.

Anhand der identifizierten Zielobjekte lassen sich verschiedene Schwerpunkte feststellen. Nahezu die Hälfte der Ansätze fokussiert den Auslauf von Produkten, während die andere Hälfte nahezu gleichmäßig zwischen Produktionssystemen, Werken und Produktionsnetzen verteilt ist. Die Auswertung der funktionalen Perspektiven der Ramp-down Managementansätze zeigt, dass 50% der Ansätze den Ramp-down aus Sicht der Logistik betrachten werden. Der Rest ist nahezu gleichverteilt auf die Sichtweisen Management, Marketing und Produktion sowie übergreifende Ansätze.

Knapp die Hälfte der bestehenden Ansätze entstammen aus der Elektronik- und Automobilbranche, wo aufgrund der großen Anzahl an Komponenten in den Baugruppen und dadurch resultierenden Restbeständen bei schlecht geplanten Produktwechseln, die Notwendigkeit eines strukturier-ten Ramp-down Managements frühzeitig erkannt wurde. Wenngleich einige der Ramp-down Managementansätze auf industriellen Anwendungsfällen beruhen, sind lediglich ein Drittel dieser nachweislich in der Industrie umgesetzt und validiert.

Bisherige Ansätze verfolgen zumeist eine betriebswirtschaftliche Sichtweise auf die Kostentreiber (Lagerkosten, Ersatzteile etc.) des Ramp-downs. Aus Sicht der Produktion, die den Ramp-down durchlaufen muss, fehlt es jedoch an Hilfsmitteln für dessen Planung und Durchführung. Zwar liefert WAGNER eine erste Anpassung der PPS für den Ramp-down, deren Umsetzung in der Industrie und die Untersuchung damit verbundener Auswirkungen auf die Produktion bleibt jedoch aus [6]. Gleiches gilt für die Umsetzung der von AURICH ET AL. beschriebenen Reduktions- und Rückbauphasen [37]. In den bestehenden Ansätzen des Ramp-down Managements kommen hauptsächlich analytische Berechnungen und Modelle zum Einsatz. AURICH ET AL. schlagen eine Abbildung des Produktionssystems als Modell in einer virtuellen Realität vor, um sämtliche Auswirkungen der Maßnahmen aus dem Rückbauprozess frühzeitig festzustellen und die Umsetzung des Ramp-downs weiter zu beschleunigen [38]. Die Verwendung eines Simulationsmodells des Produktionssystems als Basis für die Planung und Durchführung des Ramp-downs in der Produktion ist bis dato jedoch nicht untersucht worden.

3 Der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme

Die zunehmende Digitalisierung in der Produktion sowie steigende, jedermann zugängliche Rechenleistung führen zum vermehrten Einsatz digitaler Lösungen in der Planung und dem Betrieb von Produktionssystemen [55]. Bild 17 zeigt wesentliche digitale Lösungen anhand der Einführung ihrer Verwendung im industriellen Umfeld. Der Einsatz der Systeme stellte zum jeweiligen Zeitpunkt immer eine Disruption mit teilweise direkt messbaren Vorteilen für den Anwender dar [9]. Gemäß der steigenden Popularität des Digitalen Zwillings in der Forschung sowie in der Anwendung produzierender Unternehmen, kann dieser als nächste digitale Lösung angesehen werden [P1].

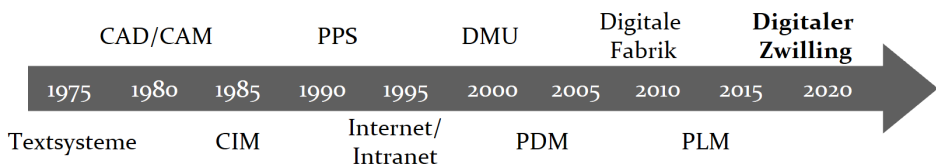


Bild 17: Chronologische Einordnung digitaler Lösungen und Systeme in der industriellen Anwendung (Abkürzungen sind dem Abkürzungsverzeichnis zu entnehmen) in Anlehnung an [9]

Viele Anwendungen Digitaler Zwillinge beruhen auf dem Einsatz von Simulationsmodellen. Infolgedessen werden im kommenden Unterkapitel die Grundlagen der Simulation im Allgemeinen und der ereignisdiskreten Materialflusssimulation im Speziellen sowie die Vorgehensweise bei der Durchführung von Simulationsstudien beschrieben. Darüber hinaus werden Einsatzgebiete der ereignisdiskreten Materialflusssimulation vorgestellt. Der Fokus auf die ereignisdiskrete Materialflusssimulation ergibt sich durch deren Fähigkeit zur Abbildung ganzer Produktionssysteme inklusive deren internen Wirkzusammenhänge sowie der Möglichkeit der Bewertung von Änderungen am Produktionssystem anhand gängiger Kennzahlen. Im zweiten Unterkapitel wird der Digitale Zwilling beschrieben. Hierzu zählen eine initiale Begriffsdefinition, verwandte Konzepte sowie das DTSM. Das Kapitel schließt mit einer Zusammenfassung und Schlussfolgerung.

3.1 Ereignisdiskrete Materialflusssimulation von Produktionssystemen

Der Ausdruck Simulation entstammt etymologisch dem lateinischen Wort „simulare“, das übersetzt ab- bzw. nachbilden bedeutet [56]. Die Simulation wird in der VDI RICHTLINIE 3363 BLATT 1 wie folgt definiert:

„Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind; insbesondere werden die Prozesse über die Zeit entwickelt.“ [57]

In den folgenden Unterkapiteln werden die Aspekte dieser Definition genauer beleuchtet sowie die Einsatzfelder der ereignisdiskreten Materialflusssimulation vorgestellt.

3.1.1 Grundlagen der Simulation

Gemäß der vorgestellten Definition beinhaltet die Simulation die Abbildung eines Systems inklusive dessen Prozesse. Ein System wird von der VDI-RICHTLINIE 3633 BLATT 1 als „eine von ihrer Umwelt abgegrenzte Menge von Elementen, die miteinander in Beziehung stehen“ [57] definiert. Ein Prozess ist definiert als die „Gesamtheit von aufeinander einwirkenden Vorgängen in einem System, durch die Materie, Energie oder Informationen umgeformt, transportiert oder auch gespeichert werden“ [57]. Die Abbildung eines Systems inklusive der Prozesse erfolgt in einem Modell. Modelle sind die „vereinfachte Nachbildung eines geplanten oder existierenden Systems mit seinen Prozessen in einem anderen begrifflichen oder gegenständlichen System“ [57]. Bild 18 zeigt den Zusammenhang der Begrifflichkeiten in einem Kreislauf. Demnach entsteht durch die Modellierung und Abstraktion eines geplanten oder realen Systems ein Simulationsmodell, das mittels Durchführung von Experimenten Ergebnisse liefert [56]. Auf Basis der Interpretation und Übertragung auf das reale oder geplante System können Folgerungen geschlossen werden, die entweder zur Umsetzung im realen oder geplanten System führen oder weitere Parametervariationen und somit weitere Experimente zur Folge haben, bis ein passendes Ergebnis erzielt wird [56].

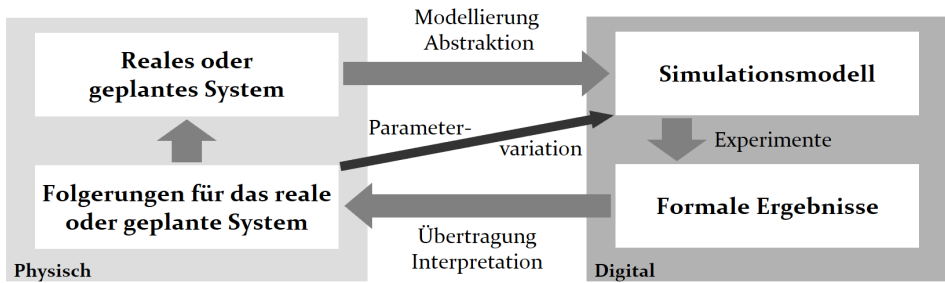


Bild 18: Zusammenhänge zwischen Systemen und Modellen im Kontext der Simulation in Anlehnung an [56]

Simulationsmodelle lassen sich anhand unterschiedlicher Eigenschaften klassifizieren. Zuerst wird zwischen Modellen mit dynamischem oder statischem Verhalten unterschieden. Während dynamische Modelle ein Verhalten über die Zeit besitzen, ist das Verhalten statischer Modelle zeitunabhängig. Die zeitabhängige Abbildung des Verhaltens dynamischer Modelle kann kontinuierlich oder diskret realisiert werden, wobei eine Diskretisierung der Zeit oder der Zustandsgrößen verwendet werden kann. Des Weiteren wird zwischen zeit- und ereignisdiskretem Verhalten der Simulation unterschieden. Unabhängig davon können in dynamischen Modellen zufallsbedingte Ereignisse mit abgebildet werden. Diese Modelle werden als stochastisch bezeichnet, wohingegen Modelle ohne Zufälligkeiten als deterministisch gelten. [58] Bild 19 zeigt die verschiedenen Dimensionen und eine Einordnung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation.



Bild 19: Klassifikation von Simulationsmodellen inklusive Verortung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation in Anlehnung an [58]

3.1.2 Durchführung von Simulationsstudien

Für die Durchführung von Simulationsstudien sind verschiedene Vorgehensmodelle entstanden. Grundlage dieser Arbeit ist das erweiterte Vorgehensmodell der VDI RICHTLINIE 3633 BLATT 1 von WENZEL ET AL., das in Bild 20 dargestellt ist. Es besteht aus drei aufeinanderfolgenden Phasen. Die erste Phase, die Definitions- und Angebotsphase, bildet mit einer initialen Zielbeschreibung sowie einem Angebot die Grundlage für die Durchführung der Simulationsstudie, die die zweite Phase darstellt [59]. Diese startet

mit der Präzisierung der Aufgabenstellung bevor die eigentliche Modellbildung folgt [57]. Diese besteht aus den Einzelschritten Systemanalyse, Modellformalisierung und Implementierung [59]. Die Datenbeschaffung und -aufbereitung können parallel zur Modellierung verlaufen, da sie in keiner zeitlichen und inhaltlichen Abhängigkeit zu ihr stehen [60]. Die beiden Stränge treffen sich im Schritt der Experimente und Analyse wieder [57].

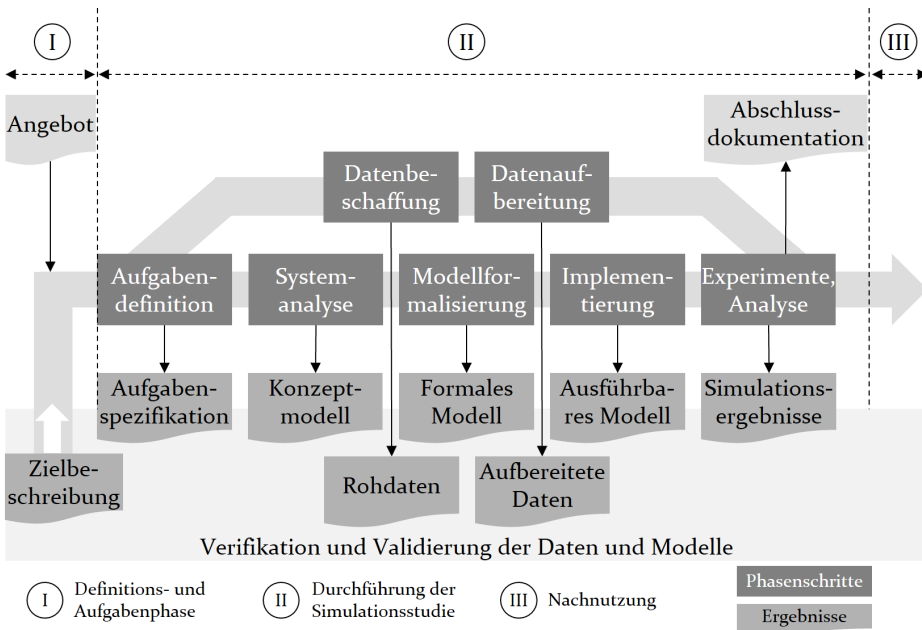


Bild 20: Erweitertes Vorgehensmodell für die Durchführung von Simulationsstudien in Anlehnung an [59]

In den Experimenten sollen durch systematische Parametervariation in mehreren Simulationsläufen möglichst schnell die vereinbarten Zielgrößen und -szenarien, das sogenannte Simulationsziel, erreicht werden [57, 61]. So können beispielsweise die Auswirkungen spezifischer Änderungen in der Auftragsreihenfolge der Produktion mittels einzelner Experimente analysiert werden. Soll jedoch eine optimale Lösung auf Basis definierter Parametervariationen, in vorherigem Beispiel die verschiebbaren Aufträge inklusive derer Losgrößen, gefunden werden, so können Simulation und Optimierung gekoppelt werden, um dem Simulationsanwender den bestmöglichen Lösungsvorschlag anzubieten [62, 27]. Bei der Kombination von Simulation und Optimierung wird zwischen den vier in Bild 21 dargestellten Ausprägungen unterschieden.

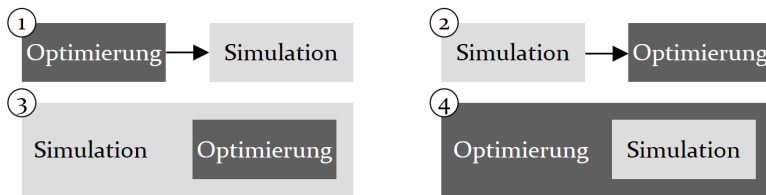


Bild 21: Vier Möglichkeiten der Verknüpfung von Simulation und Optimierung in Anlehnung an [62]

Die vierte Möglichkeit, Simulation als Teil der Optimierung, ist hervorzuheben, da sie in der Umsetzung am häufigsten anzutreffen ist [27]. Sie erlaubt den Einsatz von Optimierungsverfahren, wenn keine Zielfunktion in geschlossener Form definierbar ist, indem das Simulationsmodell die Simulationsergebnisse als Eingangsgrößen für die Optimierung bereitstellt [27, 62]. Die Durchführung der Simulationsstudie endet mit der Dokumentation der Simulationsergebnisse sowie der Abschlussdokumentation [59].

Der Durchführung der Simulationsstudie folgt die finale Phase der Nachnutzung, in der die Wiederverwendung der Simulationsmodelle untersucht wird. Bei der Nachnutzung wird laut WENZEL ET AL. zwischen der Weiterverwendung und der Wiederverwendung unterschieden. Während bei der Weiterverwendung der Betrachtungsgegenstand des Simulationsmodells derselbe ist und lediglich die Untersuchungsziele verschieden sind, so wird bei gleichen Untersuchungszielen aber unterschiedlichen Betrachtungsgegenständen von einer Wiederverwendung gesprochen. [59]

Die Verifikation und Validierung der Modelle und Daten ist von zentraler Bedeutung, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Wirklichkeit (s. Definition in Kapitel 3.1) zu gewährleisten. Daher ist die Verifikation und Validierung in allen Schritten des Vorgehensmodells durchzuführen [60]. Eine Übersicht gängiger Techniken für die Verifikation und Validierung ist in [60] gegeben.

3.1.3 Einsatzgebiete der ereignisdiskreten Materialflusssimulation

Neben der Einordnung der Simulationsmodelle nach ihren Eigenschaften (s. Bild 19), können diese auch entsprechend der zu lösenden Problemstellungen unterschieden werden. Bild 22 zeigt die Zuordnung exemplarischer Planungsinhalte zu passenden Simulationsmodellen auf jeder Planungsebene. Auf Ebene der Produktionssysteme kommt hauptsächlich die ereignisdiskrete Materialflusssimulation zum Einsatz, um den Materialfluss zu

planen und Layoutfragestellungen zu beantworten [63]. Aber auch darüber hinaus ist die ereignisdiskrete Materialflusssimulation über nahezu alle Planungsebenen am verbreitetsten [64].

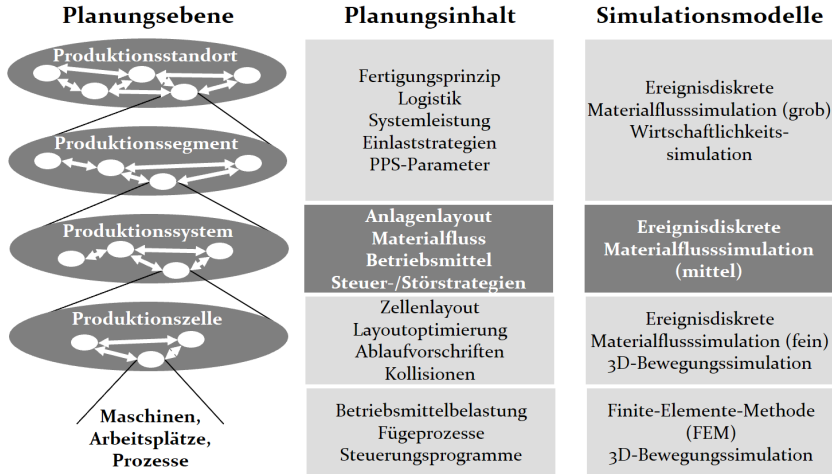


Bild 22: Simulationseinsatz und Planungsinhalte eingeordnet in das Ebenenmodell der Produktion in Anlehnung an [63]

Die VDI-RICHTLINIE 3633 BLATT 1 ordnet den Simulationseinsatz in den Lebenszyklus technischer Systeme ein [57]. Bild 23 zeigt die typischen Fragestellungen in den Phasen Planung, Realisierung und Betrieb, die mittels Simulation gelöst werden können. Während die Realisierung als eigenständige Phase mit der Simulation der Anlaufkurve dargestellt ist, wird der Simulationseinsatz im Ramp-down, beispielsweise mit der Simulation der Auslaufkurve, nicht betrachtet [57]. Dies macht wieder deutlich, dass dem Themenkomplex des Ramp-downs im Vergleich zum Serienanlauf bisher weniger Beachtung geschenkt wurde.

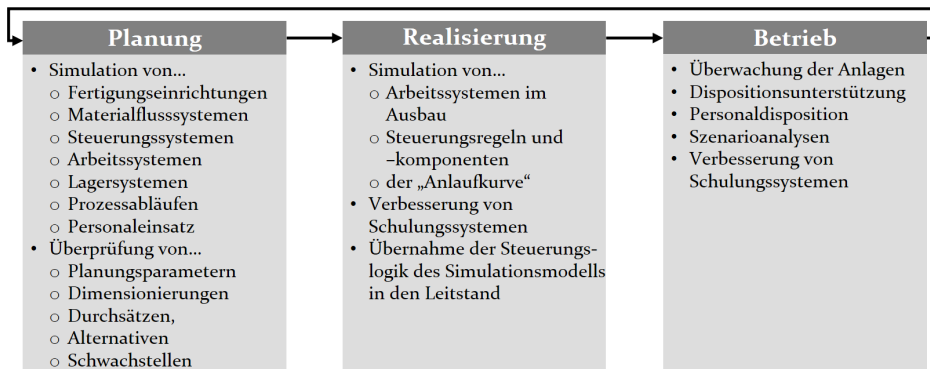


Bild 23: Einordnung typischer Fragestellungen für die Simulation in den Lebenszyklus technischer Systeme in Anlehnung an [57]

Konkreter werden MÄRZ ET AL. bei ihrer Einordnung der simulationsgestützten Optimierung, die in Bild 24 dargestellt ist. Es werden explizite Einsatzfelder der simulationsgestützten Optimierung anhand deren Planungshorizont und Änderungsdynamik aufgezeigt [27]. Diese beinhalten Fragestellungen der PPS, die WAGNER in ihrem generischen Prozessmodell zur Abwicklung von Ausläufen identifiziert hat (s. Bild 15). Hierzu gehören die Bestimmung der Fertigungslosgröße, die Optimierung der Auftragsreihenfolge sowie die Planung des Mitarbeiterereinsatzes [27]. Es ist demnach davon auszugehen, dass der Einsatz der ereignisdiskreten Materialflusssimulation im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme einen Beitrag zur Erhöhung der Planungssicherheit und -genauigkeit leisten kann.

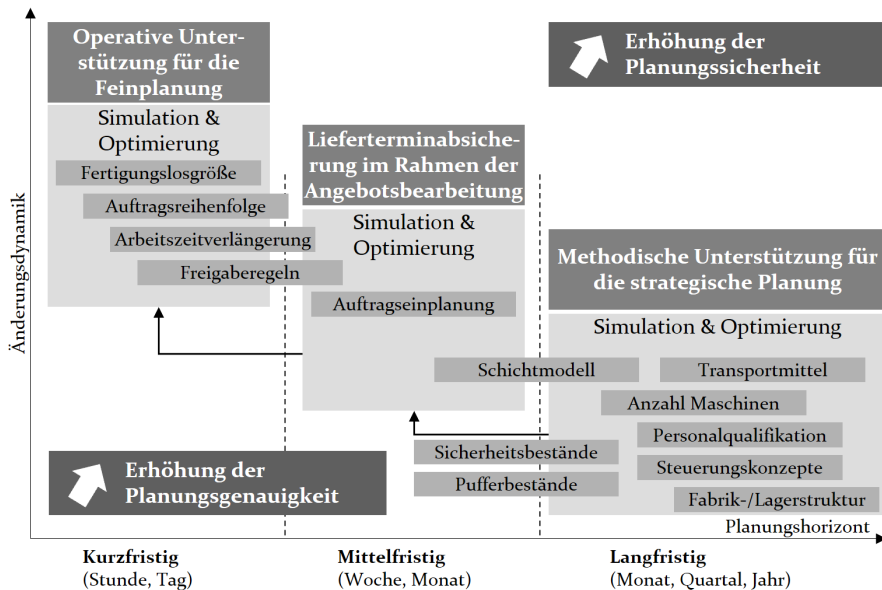


Bild 24: Einsatzfelder der simulationsbasierten Optimierung anhand der Dimensionen Planungshorizont und Änderungsdynamik in Anlehnung an [27, 31]

3.2 Der Digitale Zwilling

Der Einsatz der ereignisdiskreten Materialflusssimulation verursachte in der Planung und dem Betrieb von Produktionssystemen einen Wandel, indem dem Nutzer ein neues Werkzeug zur Lösungsfindung an die Hand gegeben wurde [9]. Der Verwendung Digitaler Zwillinge wird ein ähnlicher Wandel in der Planung und dem Betrieb von Produktionssystemen zugeschrieben. Dies ist anhand der rapide steigenden Anzahl an wissenschaftli-

chen Veröffentlichungen, aber auch industriellen Anwendungsfällen zu erkennen [P1]. Obwohl das Themengebiet seit einigen Jahren im Fokus der Forschung steht, hat sich noch keine einheitliche Definition des Begriffs Digitaler Zwilling durchsetzen können. So ist es aktuell noch unklar, welche Eigenschaften, Funktionen oder welchen Nutzen ein Digitaler Zwilling im Allgemeinen hat. Daher werden in den folgenden Unterkapiteln bestehende Definitionen des Digitalen Zwillings sowie verwandte Konzepte vorgestellt. Auf Basis dessen wird ein Referenzmodell für den Digitalen Zwilling, das DTSM, vorgestellt. Einzelne Aspekte der folgenden Ausführungen wurden vom Autor in [P1–P3] der internationalen Fachwelt zugänglich gemacht.

3.2.1 Begriffsdefinition

Der Begriff des Digitalen Zwillings kam erstmals in den frühen 2000er Jahren auf, als GRIEVES das Mirrored Spaces Model vorgestellt hat [65]. Wie Bild 25 zeigt, besteht es aus einem realen und einem virtuellen Raum [65]. Die beiden Räume sind durch einen Datenfluss von realem zu virtuellem und einem Informationsrückfluss von virtuellem zu realem Raum verbunden [65]. Während es den realen Raum und die darin enthaltenen Elemente nur einmal gibt, können mehrere Instanzen des virtuellen Raums für ein reales Gegenstück bestehen, die beispielsweise verschiedene Designalternativen beinhalten [66]. Eine der zentralen Eigenschaften des Konzepts ist die Verknüpfung von realem und virtuellem Raum über den gesamten Lebenszyklus des betrachteten realen Systems [66].

Gleichzeitig weist GRIEVES auf den Irrtum hin, Digitale Zwillinge können erst ab dem Vorhandensein ihrer physischen Pendant existieren. Gemäß der grundlegenden Definition des Digitalen Zwillings ist dies nicht notwendig. Einzig allein die gleichzeitige Existenz von Digitalem Zwilling und realem Pendant an einem beliebigen Zeitpunkt des Lebenszyklus sowie die Dualität und die starke Ähnlichkeit zwischen dem Digitalen Zwilling und dem realen Pendant genügen, um von Digitalen Zwillingen sprechen zu können. [67]

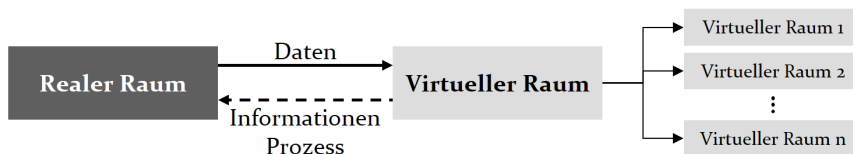


Bild 25: Das Mirrored Spaces Model in Anlehnung an [66]

Basierend auf diesem Modell existiert eine Vielzahl von Anwendungen in verschiedenen Wirtschaftszweigen. Diese reichen von der produzierenden Industrie über die Medizin bis hin zur Luft- und Raumfahrt [68]. Ein Großteil der Digitalen Zwillinge beruht hierbei auf Simulationsmodellen [69]. BOSCHERT UND ROSEN verstehen, wie in Bild 26 dargestellt, den Digitalen Zwilling als stringente Weiterentwicklung des Simulationseinsatzes und identifizieren die Simulationen als Kernbestandteil Digitaler Zwillinge über den gesamten Lebenszyklus des realen Pendants hinweg [70].

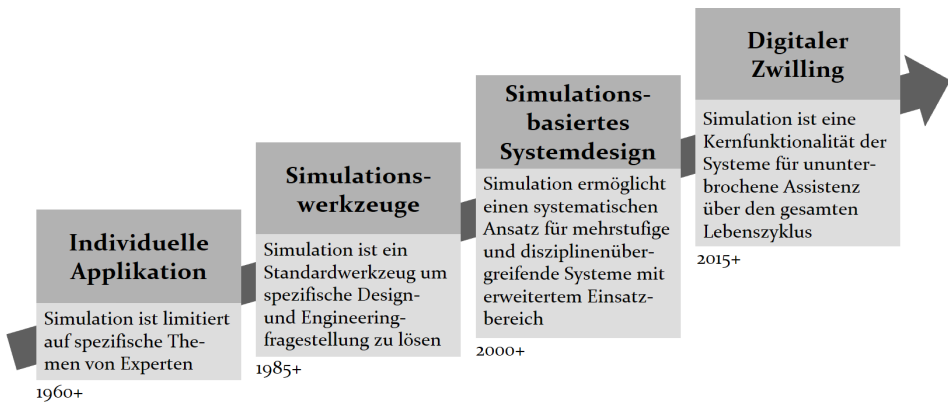


Bild 26: Der Digitale Zwilling als nächste Stufe der Weiterentwicklung der Simulation in Anlehnung an [70]

Bezüglich der Bestandteile eines Digitalen Zwillings bestehen je nach Forschungsperspektive unterschiedliche Auffassungen. Eine Übersicht bestehender Definitionen des Digitalen Zwillings ist in [P1] gegeben. Im Folgenden werden die Kernelemente Digitaler Zwillinge, die von den meisten Autoren als wesentlich erachtet werden, erläutert.

Wie bereits von GRIEVES im Mirrored Spaces Models beschrieben, ist ein Digitaler Zwilling stets ein digitales Gegenstück eines realen Produkts, einer realen Maschine oder allgemeiner, das Gegenstück eines realen Objekts oder Systems [68]. Das reale Objekt wird im Folgenden als Asset bezeichnet [71]. Unumstritten ist, dass zwischen Digitalem Zwilling und dem Asset, falls es bereits physisch existiert, eine Kopplung besteht. Die Ausprägung derer ist jedoch nicht eindeutig definiert. So setzen KRITZINGER ET AL. einen automatischen bidirektionalen Datenfluss als Kopplung voraus, um von einem Digitalen Zwilling sprechen zu können [72]. Dies ist jedoch vor allem in Hinblick auf den Einsatz Digitaler Zwillinge über den gesamten Lebenszyklus des Assets fragwürdig, da beispielsweise in der Planung und Entwicklung eines Produkts das Asset noch nicht existiert, Digitale Zwillinge jedoch bereits zum Einsatz kommen können.

Digitale Zwillinge können aus Datenmodellen bestehen, die beispielsweise Simulationen ermöglichen [73]. Jedoch ist die Simulationsfähigkeit keine zwingende Eigenschaft Digitaler Zwillinge, vielmehr bleibt das grundlegende Verständnis von GRIEVES, dass der Digitale Zwilling eine digitale Repräsentation eines Assets beinhaltet, der kleinste gemeinsame Nenner der bestehenden Definitionen. Die Einsatzzwecke Digitaler Zwillinge lassen sich entlang des gesamten Lebenszyklus der Assets finden. Sie beruhen stets auf dem Vorteil der Erprobung verschiedener Szenarien in mehreren virtuellen Räumen (s. Bild 25), um eine Verbesserung zu erzielen, ohne dabei das Asset negativ zu beeinflussen. Beispiele hierfür sind der Einsatz in der PPS oder im Bereich des Service und der vorrausschauenden Wartung von Maschinen [72]. Darüber hinaus erlauben Digitale Zwillinge durch eine Kopplung zum realen Objekt echtzeitnahe Optimierungen sowie die Steuerung ihres Assets [73].

Der technologische Fortschritt im Kontext der Industrie 4.0 ermöglicht beispielsweise die Kopplung der Assets mit Simulationsmodellen, wodurch die Metapher der Zwillinge im Betrieb der Assets durch die parallele Existenz und digitale Kopplung von Asset und Digitalem Zwilling inklusive der daraus resultierenden schnellen Aktualisierbarkeit des Digitalen Zwillings an Bedeutung gewonnen hat. Die durch die digitale Kopplung ermöglichten neuen Anwendungsfälle stellen jedoch nur eine Ausprägungsform Digitaler Zwillinge dar.

Wie von GRIEVES beschrieben, darf die Zwillingsmetapher im Sinne der ständigen Koexistenz beider Zwillinge nicht überstrapaziert werden. Stattdessen können Digitale Zwillinge bereits in der Planung und Entwicklung und somit vor der physischen Existenz des Assets erstellt und genutzt werden. Dies hat zur Folge, dass die zuvor genannten beispielhaften Anwendungsfälle, die bereits seit mehreren Jahren existieren, unter Beachtung der Kriterien der Dualität und der starken Ähnlichkeit auch als Digitale Zwillinge bezeichnet werden [67]. Die dieser Dissertation zugrundeliegende Definition folgt diesem Grundsatz und wird in Unterkapitel 3.2.3 anhand des dort vorgestellten DTSM gegeben.

3.2.2 Verwandte Konzepte

Neben dem Digitalen Zwilling sind eine Reihe weiterer Konzepte entstanden, die teilweise die gleichen oder ähnliche Aspekte beinhalten. Im Folgenden werden komplementäre Konzepte kurz erläutert. Eine Übersicht weiterer, zumeist als Synonym zum Digitalen Zwilling verwendeter Konzepte sind in [P1] beschrieben.

Wie in Unterkapitel 3.2.1 dargelegt, bilden Modelle die Grundlage Digitaler Zwillinge. KRITZINGER ET AL. beschreiben digitale Modelle als eine digitale Repräsentation eines geplanten oder existierenden Assets, wobei keine automatische Datenkopplung mit dem Asset besteht [72]. Demnach gehören Simulationsmodelle oder mathematische Beschreibungsmodelle zur Gruppe der digitalen Modelle [72]. BOSCHERT UND ROSEN hingegen verwenden wie viele andere Autoren den Begriff des digitalen Modells als Synonym für den Digitalen Zwilling [69, 70]. Dies macht die Uneinigkeit über die Begriffsdefinition des Digitalen Zwillings in der Literatur deutlich.

Im Kontext des Digitalen Zwillings ist das Konzept des Digitalen Schattens (engl. Digital Shadow) entstanden. BAUERNHANSL ET AL. definieren ihn als „das hinreichend genaue Abbild der Prozesse in der Produktion, der Entwicklung und angrenzenden Bereichen mit dem Zweck, eine echtzeitfähige Auswertungsbasis aller relevanten Daten zu schaffen“ [55]. In Bezug auf das Mirrored Spaces Model (s. Bild 25) stellt er den Pfeil vom realen in den virtuellen Raum dar. Der Digitale Schatten wird zumeist als notwendiger Bestandteil eines Digitalen Zwillings verstanden, da er die Überführung der realen Produktionsprozesse in den virtuellen Raum darstellt [55]. FRANZEN ET AL. bestärken die Sichtweise, dass der Digitale Schatten die Daten aus dem Betrieb des Assets sammelt und weiteren Anwendungen zur Verfügung stellt [74]. Über den gesamten Lebenszyklus eines Assets betrachtet, besteht aus dieser Sichtweise der Digitale Schatten somit erst ab Beginn dessen physischer Existenz. Der Definition von KRITZINGER ET AL. folgend sind demnach Digitale Zwillinge erst ab diesem Zeitpunkt möglich [72]. Da, wie zuvor beschrieben, Digitale Zwillinge bereits in der Planung und Entwicklung der Assets erstellt und eingesetzt werden können, stellt der Digitale Schatten im Verständnis der vorliegenden Dissertation keinen zwingenden Bestandteil Digitaler Zwillinge dar, sondern vielmehr eine wertvolle Ergänzung derer. Des Weiteren wird der Arbeit die initiale Definition des Digitalen Schattens nach BAUERNHANSL ET AL. mit dem Fokus auf den Betriebsdaten zugrunde gelegt [55].

Neben dem Digitalen Schatten ist der Begriff des Digitalen Fadens (engl. Digital Thread) aufgekommen. Laut MASSONET ET AL. bezeichnet er die „Verfügbarmachung der Daten aus verteilten Datenquellen“ [75]. Während der Digitale Schatten somit die Daten aus dem Betrieb des Assets abbildet, verknüpft der Digitale Faden die verschiedenen Datenquellen über den Lebenszyklus hinweg und stellt diese dem Digitalen Zwilling zu Verfügung [76]. Neben dieser Definition unterscheiden BOSCHERT UND ROSEN zwischen Digitalem Faden und Digitalem Zwilling aus Sicht des Lebenszyklus, indem der Digitale Faden in der Planung und der Digitale Zwilling

im Betrieb und der Wartung des Assets eingesetzt werden [70]. Ein eindeutiges Verständnis des Konzeptes hat sich bis zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht etabliert, wobei davon ausgegangen werden kann, dass aufgrund von steigender Datenverfügbarkeit in der Produktion deren Verfügbarmachung aus verschiedenen Datenquellen an Bedeutung gewinnen wird.

Neben den beschriebenen Konzepten, die den Digitalen Zwilling ergänzen, besteht seit 2008 mit dem Begriff der Digitalen Fabrik ein auf den ersten Blick dem Digitalen Zwilling ähnliches Konzept [77]. Gemäß der VDI RICHTLINIE 4499 BLATT 1 ist die Digitale Fabrik wie folgt definiert:

„Die Digitale Fabrik ist der Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen, Methoden und Werkzeugen – u. a. der Simulation und der dreidimensionalen Visualisierung –, die durch ein durchgängiges Datenmanagement integriert werden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Evaluierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Strukturen, Prozesse und Ressourcen der realen Fabrik in Verbindung mit dem Produkt.“ [77]

Sie beinhaltet demnach sowohl die zuvor beschriebenen digitalen Modelle sowie die vernetzenden Aspekte und das Datenmanagement des Digitalen Fadens mit dem Ziel der ganzheitlichen Verbesserung der Fabrik [9]. Bild 27 zeigt den Fokus der Digitalen Fabrik in der Kreuzung von Produkt- und Produktionsentstehungsprozess sowie dem Auftragsabwicklungsprozess mit den gängigen Simulationswerkzeugen, wie beispielsweise der Materialflusssimulation [77].

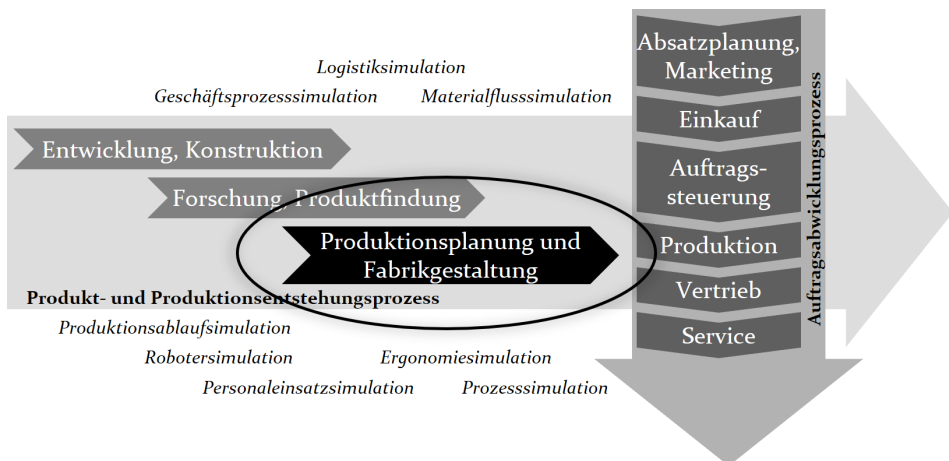


Bild 27: Fokus der Digitalen Fabrik inklusive gängiger Werkzeuge in kursiv in Anlehnung an [77]

Während die Digitale Fabrik das übergreifende Konzept darstellt, fokussiert der Digitale Fabrikbetrieb den durchgängigen Einsatz der Werkzeuge der Digitalen Fabrik, um die Prozesse der realen Fabrik kontinuierlich zu optimieren und die Modelle stets aktuell zu halten [78]. Diese Aspekte decken sich zum Großteil mit den in Unterkapitel 3.2.1 beschriebenen Kerneigenschaften Digitaler Zwillinge. Dennoch ist im Kontext der Digitalen Fabrik der Fokus auf den Prozessen und Objekten einer zu planenden oder bereits bestehenden Fabrik, wohingegen der Digitale Zwilling ein übergeordnetes Konzept in Bezug auf unterschiedliche Assets darstellt.

3.2.3 Das Digital Twin Structure Model

Aufgrund der fehlenden einheitlichen Definition des Digitalen Zwillings unterscheiden sich auch dessen Anwendungsfälle deutlich. Das DTSM integriert die beschriebenen Konzepte und Definitionen in ein Strukturmodell. Es ermöglicht die Einordnung verschiedener Anwendungsfälle anhand definierter Dimensionen und erlaubt somit den Vergleich diverser Ausprägungen Digitaler Zwillinge. Das DTSM wurde bereits vom Autor der internationalen Fachwelt zugänglich gemacht, weshalb Aspekte der folgenden Ausführungen an die Veröffentlichung [P2] angelehnt sind.

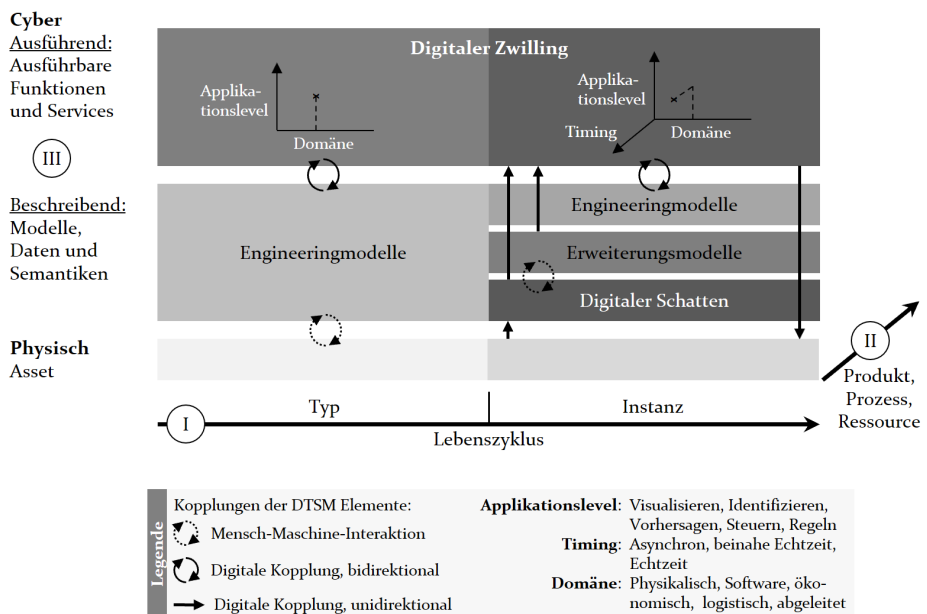


Bild 28: Das DTSM mit den Achsen Lebenszyklus (I), Produkt-Prozess-Ressource (PPR) (II) und Physisch-Cyber (III) in Anlehnung an [P2]

Bild 28 zeigt das gesamte DTSM. Es ist aus den folgenden drei Achsen aufgebaut:

- **Lebenszyklus (I):**
Der Lebenszyklus eines Assets wird in Anlehnung an das Referenzarchitekturmodell RAMI4.0 in Typ und Instanz aufgeteilt. Während der Entwicklung besteht das Asset als Typ. Die Herstellung des Assets stellt die Instanziierung des Typens dar. So wird beispielsweise ein Produkt einmalig als Typ geplant, wohingegen durch dessen mehrfache Produktion eine Vielzahl individueller Instanzen des Produkts existieren kann. [71]
- **PPR (II):**
Die Unterscheidung des Assets erfolgt in den Kategorien Produkt, Prozess und Ressource (PPR) [79]. Diese hat sich aus informationstechnischer Sicht für die Unterscheidung von Assets im Kontext der Produktion etabliert [80].
- **Physisch-Cyber (III):**
Die dritte Achse unterscheidet zwischen dem Asset in der physischen Ebene und dessen Repräsentation in der Cyber-Ebene. Die Cyber-Ebene ist weiter unterteilt in einen passiven, beschreibenden Teil mit den digitalen Modellen, Daten und Semantiken und einem aktiven, ausführenden Teil mit digitalen Funktionen und Services. [P2]

Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile des DTSM beginnend mit dem Asset in der Entwicklung entlang der dritten Achse beschrieben.

Die Grundlage eines Digitalen Zwillings bildet das Asset, da ohne das Ziel einer Verbesserung eines zukünftig realen Produkts, Prozesses oder Ressource kein Digitaler Zwilling erstellt wird. In der physischen Ebene existiert das Asset noch nicht. Entlang des Lebenszyklus stellt die Herstellung des Assets den Übergang von Typ zu Instanz dar. Ab diesem Zeitpunkt besteht die Möglichkeit, dass Daten über das Asset aufgezeichnet oder vom Asset selbst in digitaler Form erfasst und mit dem Digitalen Zwilling geteilt werden können. [P2]

Im beschreibenden Teil der Cyber-Ebene liegen im Typen die sogenannten Engineeringmodelle. Diese beinhalten sämtliche Modelle, Daten und Semantiken, die das Asset beschreiben (s. Definition digitaler Modelle in Unterkapitel 3.2.2). Beim Übergang in die Instanz werden die Engineeringmodelle vererbt, sodass jedes physische Asset die Engineeringmodelle des Typens behält. Zusätzlich zu den Engineeringmodellen wird im beschreibenden Teil der Cyber-Ebene der Digitale Schatten (s. Unterkapitel 3.2.2)

verortet. Auf Basis des Digitalen Schattens können wiederum instanzspezifische Erweiterungsmodelle entwickelt werden, die zwischen den vererbten Engineeringmodellen und dem Digitalen Schatten angeordnet sind. Bei den Erweiterungsmodellen handelt es sich beispielsweise um instanzspezifische Modelle des maschinellen Lernens, die auf Basis des Digitalen Schattens erstellt, parametrisiert und für genau ein instanziiertes Asset verwendet werden. [P₂]

Über dem beschreibenden befindet sich der ausführende Teil der Cyber-Ebene mit den Digitalen Zwillingen. Hier liegen die ausführbaren Funktionen und Services. Im Typen werden diese anhand der Dimensionen Applikationslevel und Domäne eingeordnet. Die Applikationslevel bestehen aus Visualisieren, Identifizieren, Vorhersagen, Steuern und Regeln und sind in steigender Komplexität angeordnet. Zu den Domänen zählen physikalisch, Software, ökonomisch, logistisch sowie davon abgeleitete Domänen. In der Instanz wird durch die Fähigkeit zur Kopplung mit dem Asset die Einordnung um die Achse Timing ergänzt. Diese Achse beschreibt die Ausprägung der Kopplung in den Stufen asynchron, beinahe Echtzeit, was zumeist einer „Live-Anbindung“ zuzuordnen ist, und prozessbezogener Echtzeit. [P₂]

Maßgeblich für die Einordnung in die Dimension Timing sind die Kopplungen zwischen dem Asset und den Engineering- und Erweiterungsmodellen sowie dem Digitalen Schatten und dem Digitalen Zwilling. Diese lassen sich grundsätzlich in Mensch-Maschine-Interaktionen und uni- sowie bidirektionale digitale Kopplungen unterscheiden. Beginnend mit dem Asset im Typen besteht eine Mensch-Maschine-Interaktion bei der Erstellung der Engineeringmodelle, beispielsweise durch die softwaregestützte Konstruktion eines Maschinenbauteils. Gleiches ist bei der Erstellung der Erweiterungsmodelle auf Basis des Digitalen Schattens wieder zu finden. Bidirektionale digitale Kopplungen bestehen zwischen Engineeringmodellen und dem Digitalen Zwilling, da die Funktionen und Services die Engineeringmodelle ausführen und Ergebnisse direkt in die Modelle oder das Asset zurückspeisen können. Unidirektionale digitale Kopplungen liegen bei der Sammlung und Speicherung von Daten im Digitalen Schatten sowie bei der Verwendung der Erweiterungsmodelle und des Digitalen Schattens im Digitalen Zwilling vor. Falls der Digitale Zwilling direkt wieder auf das physische Asset zurückgreift (vgl. Applikationslevel Steuern oder Regeln), besteht zwischen Digitalem Zwilling und physischem Asset auch eine unidirektionale, digitale Kopplung. [P₂]

Auf Basis des DTSM wird der Digitale Zwilling wie folgt definiert:

„Ein Digitaler Zwilling ist die Menge ausführbarer digitaler Applikationen und Funktionen auf Basis von Engineering- und Erweiterungsmodellen sowie dem Digitalen Schatten. Er generiert dem physischen Asset oder dessen Betreiber einen Mehrwert, indem er die Zustände des Assets visualisiert, identifiziert, vorhersagt oder steuert [oder regelt]. Der Digitale Zwilling befindet sich in der ausführbaren Cyber-Ebene des DTSM, umspannt den gesamten Lebenszyklus des Assets sowie Produkt, Prozess und Ressource.“ [P₂]

Um das Zusammenspiel von Digitalen Produkt-, Prozess- oder Ressourcenzwillingen zu analysieren, existiert eine Interaktionsdarstellung des DTSM. Da die vorliegende Dissertation den Digitalen Zwilling einer Ressource fokussiert, wird auf die detaillierte Beschreibung der Interaktionsdarstellung an dieser Stelle verzichtet. Sie ist in [P₂] dargestellt und erläutert. Die Einordnung von Anwendungsfällen in die Dimensionen des DTSM zeigt die Tauglichkeit des DTSM zur Einordnung und Systematisierung Digitaler Zwillinge [P₂]. Weitere Ausprägungen des Digitalen Zwillings der Ressource über deren Lebenszyklus sind [P₃] zu entnehmen.

3.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Die Ausführungen dieses Kapitels zeigen, dass die ereignisdiskrete Materialflusssimulation in den verschiedenen Bereichen der Planung und des Betriebs von Produktionssystemen bereits in breiter Anwendung ist. Die aktuellen Entwicklungen im Bereich des Digitalen Zwillings bestärken die Rolle der Simulation in diesen Anwendungsbereichen als eines der wichtigsten Werkzeuge zur Entscheidungsunterstützung. Darüber hinaus kann die Kombination von Optimierung und Simulation eine Reihe weiterer Aufgaben im Bereich der Produktionssystemplanung und -betrieb lösen. Auch wenn der Digitale Zwilling in der wissenschaftlichen Literatur noch nicht einheitlich definiert ist, stellen Simulationsmodelle in vielen Anwendungen die Grundlage der Digitalen Zwillinge dar.

Das eingeführte DTSM ermöglicht die Strukturierung Digitaler Zwillinge anhand der Dimensionen Lebenszyklus, PPR und cyberphysischem Raum sowie Applikationslevel, Domäne und Timing. Die Simulationsmodelle sind im DTSM im Bereich der Engineeringmodelle als eines der zentralen Aspekte integriert. Die auf dem DTSM aufgebaute Definition des Digitalen Zwillings vereint die bestehenden Konzepte der digitalen Modelle und des Digitalen Schattens und erlaubt eine Einordnung anhand der beschriebe-

nen Dimensionen. Folglich wird empfohlen, Digitale Zwillinge entsprechend der Strukturierung des DTSM, das heißt inklusive der Spezifikationen der einzelnen Objekte sowie der Interaktionsmöglichkeiten, aufzubauen. Dies erlaubt die technische Einordnung des Digitalen Zwillings und stellt eine Vergleichbarkeit her.

4 Forschungsbedarf zum simulationsbasierten Digitalen Zwilling im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme

Das folgende Kapitel führt den Stand der Wissenschaft und Technik der beiden vorhergehenden Kapitel gemäß der Zielstellung zusammen. Hierzu werden die Herausforderungen des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme den Potentialen Digitaler Zwillinge auf Basis ereignisdiskreter Materialflusssimulationen gegenübergestellt. Darauf aufbauend wird die initiale Zielstellung inklusive der Teilziele der vorliegenden Dissertation anhand von Forschungsfragen für den Ramp-down automatisierter Produktionssysteme konkretisiert. Das Kapitel endet mit einer Zusammenfassung und einer Übersicht über die folgenden Kapitel.

4.1 Erkenntnisse aus dem Stand der Wissenschaft und Technik

Wie in Kapitel 2.3 dargelegt, ist der Ramp-down automatisierter Produktionssysteme sowohl im Vergleich zum Ramp-down von Produkten als auch im Vergleich zu anderen Managementaufgaben im Kontext automatisierter Produktionssysteme, wie zum Beispiel der Planung neuer Produktionssysteme, ein wenig beforschtes Gebiet. Im Ramp-down besteht die Zielsetzung, die Auslaufkosten durch die Verringerung der Mitarbeiter- und Anlagenkapazität sowie des gebundenen Kapitals zu reduzieren [81]. Bestehende Vorgehensweisen sind dabei oft betriebswirtschaftlicher Natur, indem zum Großteil zentrale, produktbezogene Fragestellungen, wie die Terminierung eines optimalen Auslaufzeitpunkts, aus Sicht der Logistik beantwortet werden. Einige wenige Autoren stellen Produktionssysteme in den Fokus, wobei Aspekte der Umplanung und Rückbauphase oder der PPS von Produktionssystemen untersucht werden [6, 37, 45]. Wenngleich die vorgestellten Ansätze des Ramp-down Managements einen Produktionsbezug vorweisen, erlauben sie keine Bewertung der Auswirkungen einzelner Lösungsalternativen auf das bestehende Produktionssystem. Grund hierfür ist die notwendige Abstraktion des realen Produktionssystems für die jeweiligen Vorgehensweisen der Ramp-down Managementansätze, die zumeist übergeordnete Fragestellungen beantworten.

Bild 29 zeigt die Managementbereiche über den Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme (vgl. Bild 8) sowie datenbasierte Methoden und Werkzeuge für die Bearbeitung der auftretenden Herausforderungen. Darüber hinaus ist der qualitative Verlauf der vorhandenen Daten über den Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme dargestellt. Die verfügbaren Daten bestehen aus produktionssystemspezifischen Planungs- und Betriebsdaten. Obwohl es für die Phasen Ramp-up und Betrieb bereits eine Vielzahl an Ansätze für deren simulationsgestützte Planung und Durchführung gibt, sind zum jetzigen Zeitpunkt keine Ansätze bekannt, die die Simulation von Produktionssystemen in das Zentrum der produktionsbezogenen Entscheidungen im Ramp-down stellt. Dabei sind die Voraussetzungen für die simulationsbasierte Entscheidungsunterstützung gerade im Ramp-down besonders ideal, da zu diesem Zeitpunkt die größtmögliche Menge an angefallenen Daten aus dem Betrieb des Produktionssystems für die Modellierung vorhanden ist.

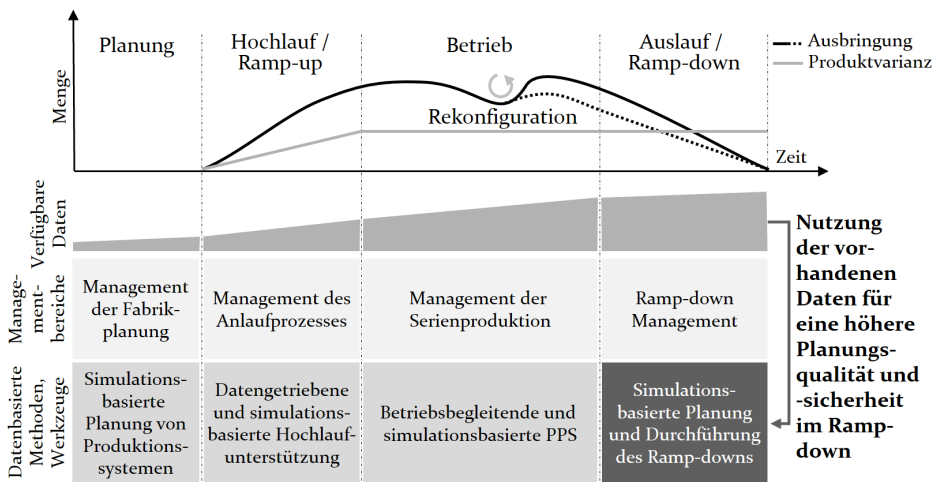


Bild 29: Einordnung von Managementbereichen und datenbasierten Methoden und Werkzeugen anhand der vorhandenen Daten über den Lebenszyklus automatisierter Produktionssysteme in Anlehnung an [5, 20, 21]

Neben den bereits identifizierten Herausforderungen im Ramp-down (s. Bild 9) steht die Produktion in automatisierten Produktionssystemen meist vor der Herausforderung, dass im Ramp-down die notwendigen manuellen Arbeiten zunehmen. Dies lässt sich auf im Ramp-down sinkende Stückzahlen zurückführen, wobei die Produktvarianz jedoch nahezu konstant bleibt (s. Bild 29). Somit nimmt die Anzahl der Rüstvorgänge zwischen verschiedenen Produktvarianten zu, wobei diese in automatisierten Produktionssystemen, die für große Stückzahlen ausgelegt sind, zumeist manuell

durchzuführen sind. Die Kernaufgabe für den Weiterbetrieb eines automatisierten Produktionssystems im Ramp-down stellt die Aufrechterhaltung der Produktivität (s. Bild 30) dar. Diese kann durch eine rüstop optimale Reihenfolgeplanung und dazugehörige Mitarbeiterinsatzplanung gewährleistet werden. Die notwendigen Anpassungen am Produktionssystem erfolgen im Ramp-down aufgrund kleinerer Losgrößen kurzzyklischer und müssen daher möglichst effizient eingeplant werden. Darüber hinaus muss der zielgerichtete Umbau des automatisierten Produktionssystems im Zuge der Rückbauphase sowie dessen Revitalisierung sichergestellt werden.

Für die Lösung dieser und vergleichbarer Herausforderungen existiert mit der ereignisdiskreten Materialflusssimulation bereits eine etablierte Methode, die in den anderen Abschnitten des Lebenszyklus breite Anwendung findet. Ihre Einsatzfelder (s. Bild 24) beinhalten die einzelnen produktionsbezogenen Fragestellungen, die im Ramp-down von besonderer Bedeutung sind. Der Einsatz der ereignisdiskreten Materialflusssimulation in der Planung und Durchführung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme erlaubt somit, dass Managemententscheidungen besser nachvollzogen und durch eine Kopplung der Simulation mit einer Optimierung darüber hinaus optimale Lösungen bestimmt werden können.

In der vorliegenden Arbeit sollen demnach die Potentiale der ereignisdiskreten Materialflusssimulation genutzt werden, um den Herausforderungen des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme zu begegnen. Hierbei handelt es sich um die simulationsbasierte Unterstützung der Eigenfertigungsplanung sowie um die simulationsbasierte Optimierung der strategischen Produktionssystemplanung. Bild 30 zeigt die produktionsbezogenen Herausforderungen, die auf Basis der Potentiale der ereignisdiskreten Materialflusssimulation in Form eines Digitalen Zwillinges eines automatisierten Produktionssystems gelöst werden sollen.

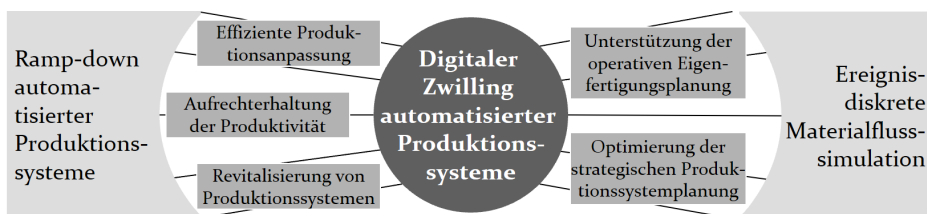


Bild 30: Der Digitale Zwilling als Lösung produktionsbezogener Herausforderungen des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme

4.2 **Konkretisierung des Forschungsbedarfs anhand von Forschungsfragen an den Digitalen Zwilling automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down**

Auf Basis der Erkenntnisse des Standes der Wissenschaft und Technik wird im Folgenden die Zielstellung der vorliegenden Dissertation weiter konkretisiert. Die Arbeit führt erstmalig den Digitalen Zwilling in den Kontext des Ramp-down Managements für eine produktionsnahe Planung und Durchführung des Ramp-downs ein. Hierbei werden automatisierte Produktionssysteme, die diskrete Produkte herstellen, gemäß der Definition in Kapitel 2.1 betrachtet. Für den zielgerichteten Einsatz eines Digitalen Zwillings in der Planung und Durchführung des Ramp-downs müssen verschiedene Aspekte, die aus der Literaturrecherche abgeleitet wurden, beachtet werden. Der Forschungsbedarf der Arbeit wird im Folgenden anhand der in Kapitel 1.2 festgelegten Teilziele in Form von Forschungsfragen genauer beschrieben.

Das erste Teilziel ist die Strukturierung des simulationsbasierten Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme für den Einsatz in der Planung und Durchführung eines Ramp-downs. Hierzu lassen sich die folgenden Forschungsfragen (F_1 , F_2) definieren:

- **F_1 : Wie kann der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme strukturiert werden, um einen effizienten Weiterbetrieb des Produktionssystems im Ramp-down sowie eine effiziente Rückbauplanung zu ermöglichen?**
- **F_2 : Wie kann sichergestellt werden, dass das Simulationsmodell nach dem Ramp-down weiterverwendet und für weitere Fragestellungen erweitert werden kann?**

Das zweite Teilziel ist die Erstellung einer Methode für den Einsatz simulationsbasierter Digitaler Zwillinge in der Planung und der Durchführung des Ramp-downs. Hierzu werden folgende Forschungsfragen (F_3 , F_4) gestellt:

- **F_3 : Wie lässt sich der Digitale Zwilling in der Planung des Ramp-downs des Produktionssystems einsetzen, um bisher ungenutzte Potentiale auszuschöpfen?**
- **F_4 : Welchen Einfluss hat der Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down des Produktionssystems auf die übergeordneten, betriebswirtschaftlichen Ansätze?**

4.3 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Auf Basis der Ausführungen dieses Kapitels lassen sich die Folgekapitel, wie in Bild 31 dargestellt, strukturieren. Das erste Teilziel wird unter Beachtung der Forschungsfragen F₁ und F₂ in Kapitel 5 bearbeitet. Die Methode für den Einsatz Digitaler Zwillinge als Teilziel 2 wird unter Beachtung der Forschungsfragen F₃ und F₄ in Kapitel 6 vorgestellt. In Kapitel 7 erfolgt die Implementierung und Validierung der Methode anhand eines Industriebeispiels. Hierbei werden zur Bewertung der Ergebnisse die Forschungsfragen F₁-F₄ hinzugezogen.

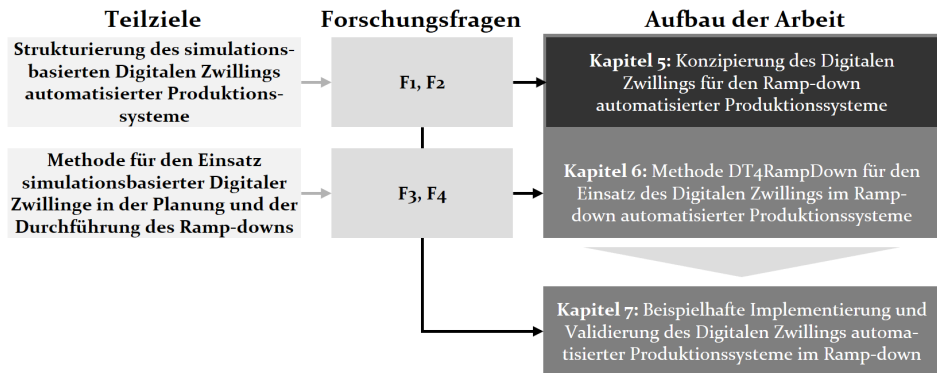


Bild 31: Zuordnung der Teilziele und Forschungsfragen zum Aufbau der Arbeit

5 Konzipierung des Digitalen Zwillings für den Ramp-down automatisierter Produktionssysteme

Um die Forschungsfragen F₁ und F₂ zu beantworten, beschreibt das folgende Kapitel den Aufbau des Digitalen Zwillings für die Planung und Durchführung des Ramp-downs. Dabei wird die Strukturierung des DTSM angewandt. Demzufolge ist das Kapitel gemäß der Zuordnung in Bild 32 aufgebaut. Die Planung und Durchführung des Ramp-downs ist zumeist kein Bestandteil der initialen Neuplanung des Produktionssystems, weshalb der Fokus im Folgenden auf einem instanziierten Produktionssystem liegt. Aufbauend auf der Beschreibung des automatisierten Produktionssystems, dem Asset, in Kapitel 5.1 folgt die Beschreibung des ereignisdiskreten Simulationsmodells in Kapitel 5.2 sowie des Digitalen Schattens automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down in Kapitel 5.3. Dabei wird auf deren Struktur, Datengrundlage und Erstellung eingegangen.

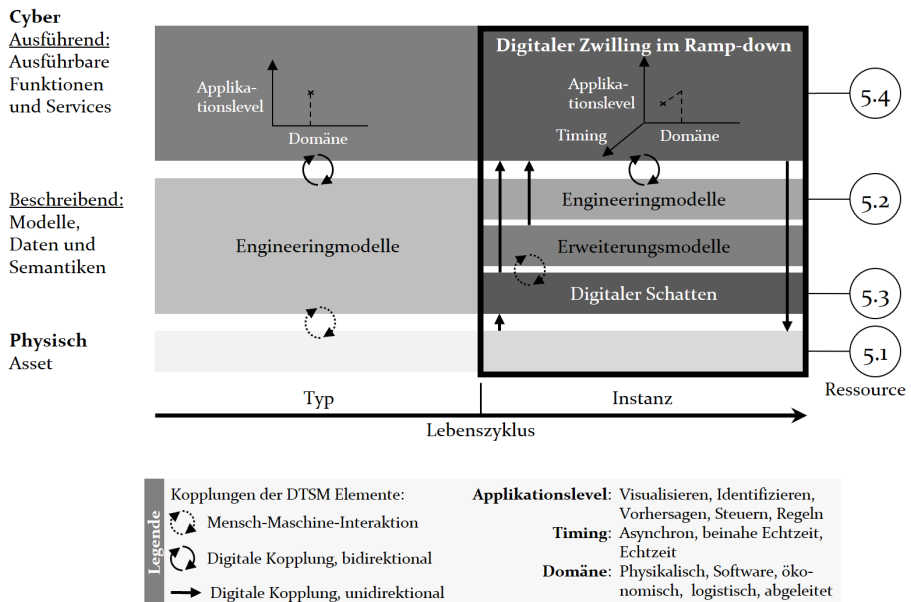


Bild 32: Strukturierung des Kapitels 5 anhand des DTSM in Anlehnung an [P2, P3]

Wie in Unterkapitel 3.2.3 beschrieben, zeichnen sich Erweiterungsmodelle durch die ausschließliche Verwendung der Daten aus dem Digitalen Schatten aus. Die im Zuge dieser Dissertation benötigten Daten und Modelle für

den Digitalen Zwilling basieren auf der Abbildung des Materialflusses automatisierter Produktionssysteme. Erweiterungsmodelle im Sinne der Definition in Unterkapitel 3.2.3 werden für die in dieser Dissertation gewählte Betrachtung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme demnach nicht benötigt. Daher wird an dieser Stelle nicht weiter auf sie eingegangen.

Das Kapitel endet mit der Beschreibung der Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down in Kapitel 5.4. Teile der folgenden Ausführungen sind an den vom Autor am Lehrstuhl FAPS betreuten studentischen Arbeiten [S1, S3, S5, S6] angelehnt und wurden vom Autor bereits der Fachwelt zugänglich gemacht [P1–P4].

5.1 Das automatisierte Produktionssystem

Untersuchungsobjekte der vorliegenden Dissertation sind automatisierte Produktionssysteme gemäß der Definition aus Kapitel 2.1. Im Folgenden werden die Struktur automatisierter Produktionssysteme inklusive ihrer Materialflüsse sowie die manuellen Tätigkeiten während ihres Betriebs genauer erläutert. Als Basis hierfür dient das in Bild 33 dargestellte, beispielhafte Produktionssystem.

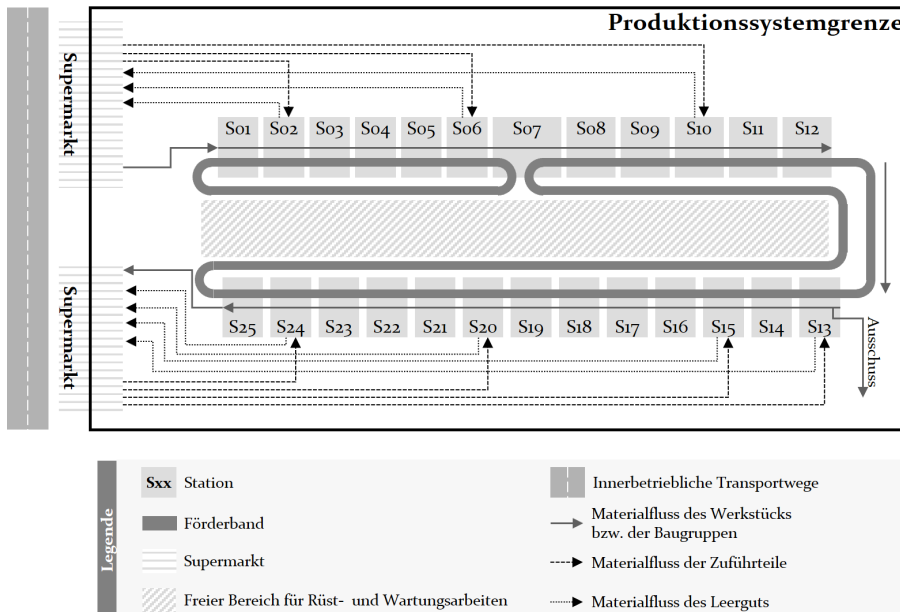


Bild 33: Schematische Darstellung eines automatisierten Produktionssystems inklusive des Materialflusses des Produkts sowie der Zuführteil- und Leergutmaterialflüsse

5.1.1 Struktur automatisierter Produktionssysteme

Die Produktionssystemgrenze ist in Bild 33 an den Lagern direkt am Produktionssystem, sogenannten Supermärkten. Diese beinhalten alle Komponenten zur Herstellung des Produktes. Supermärkte werden von der Intra-logistik eines Werkes, hier durch den innerbetrieblichen Transportweg links neben den Supermärkten dargestellt, beliefert. Für die rechtzeitige Bereitstellung der Komponenten im Supermarkt können Kanban-Karten eingesetzt werden. Neben den Komponenten werden auch deren Verpackung dem Supermarkt zur erneuten Befüllung sowie die gefertigten Produkte für die nächsten Arbeitsschritte, wie zum Beispiel den Versand, bereitgestellt. Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf dem automatisierten Produktionssystem, weshalb intralogistische Sachverhalte außerhalb der in Bild 33 dargestellten Produktionssystemgrenze nicht betrachtet werden.

In einem automatisierten Produktionssystem werden Produkte hergestellt. Falls hierbei Montageprozesse durchgeführt werden, wird ein Werkstück innerhalb des Produktionssystems ab dem ersten Montageschritt als Baugruppe bezeichnet. Automatisierte Produktionssysteme sind aus einzelnen Stationen, die durch ein oder mehrere Förderbänder verbunden sind, aufgebaut. Die Stationen lassen sich wiederum in einzelne Arbeitspositionen unterteilen. Der Transport der Werkstücke und Baugruppen von einer Arbeitsposition zur nächsten erfolgt hier mit Hilfe von Werkstückträgern (WT) auf den Förderbändern. Die Arbeitspositionen lassen sich anhand deren Funktion unterscheiden. So kann zwischen Fertigungs-, Montage- und Prüfprozessen unterschieden werden. Aus Sicht der Materialflüsse genügt die Unterscheidung zwischen Montageprozessen und den restlichen Prozessen, da Montageprozesse stets neben dem Werkstück oder der Baugruppe mindestens ein weiteres Zuführteil zur Montage benötigen. In dem in Bild 33 dargestellten automatisierten Produktionssystem enthält jede Station genau eine Arbeitsposition. Hierbei beinhalten die Stationen So2, So6, S10, S13, S15, S20 und S24 je eine Arbeitsposition mit einem Montageprozess. Diese sind an den Kennzeichnungen der zusätzlichen Zuführteilkreisläufe zu erkennen. Zuführteile werden wie die Werkstücke an einem Supermarkt von der innerbetrieblichen Logistik bereitgestellt und zumeist manuell an die jeweiligen Montagestationen gebracht. Die Verpackungen, wie zum Beispiel Kleinladungsträger oder Blister, werden zu deren erneuten Befüllung dem Supermarkt wieder leer zugeführt. Die so entstehenden Kreisläufe sind in Bild 33 durch die verschiedenen gestrichelten Pfeile dargestellt. Die Anzahl dieser Materialkreisläufe variiert in Abhängigkeit der zu montierenden Zuführteile im Produkt. Zusätzlich hierzu

werden fehlerhafte Werkstücke oder Baugruppen, sogenannter Ausschuss, an definierten Stellen des Produktionssystems ausgeschleust. In Bild 33 sind hierfür Station S13 und S25 vorgesehen.

Der hohe Automatisierungsgrad der Produktionssysteme wird an verschiedenen Stellen der Produktion deutlich. Grundsätzlich erlaubt der Einsatz eines MES die automatisierte Steuerung der Werkstücke durch das Produktionssystem. Dies ist bei der Produktion verschiedener Produktvarianten im selben Produktionssystem von entscheidender Bedeutung, da somit automatisiert die für die Produktvariante definierten Prozesse mit den richtigen Prozessparametern an den Stationen eingestellt werden, sodass hierbei kein manueller Eingriff benötigt wird. Des Weiteren kann bei automatisierten Produktionssystemen von einer hohen Verfügbarkeit von Produktionsdaten ausgegangen werden. Dies resultiert in diversen Vorteilen bei der Ausdetaillierung des Digitalen Schattens (s. Kapitel 5.3).

5.1.2 Manuelle Tätigkeiten in automatisierten Produktionssystemen

Für bestimmte Tätigkeiten in automatisierten Produktionssystemen werden Mitarbeiter benötigt. Die Aufgaben der Mitarbeiter lassen sich in logistische und fertigungsbezogene Aufgaben unterteilen. Die manuellen logistischen Tätigkeiten bestehen aus dem zuvor beschriebenen Transport der Werkstücke und Zuführteile vom Supermarkt an die Produktionslinie sowie der fertigen Produkte zum Supermarkt zurück. Der Materialtransport wird entweder zyklisch zur Aufrechterhaltung eines Mindestbestands an Zuführteilen an den jeweiligen Stationen mit Montageprozessen oder azyklisch durch einen Rüstprozess ausgelöst. Mit dem zunehmenden Einsatz fahrerloser Transportsysteme in der Produktion besteht das Potential, dass der Materialtransport in Zukunft automatisiert durchgeführt werden kann.

Die fertigungsbezogenen Tätigkeiten lassen sich in die Störungsbeseitigung und das Rüsten aufteilen. Für diese Tätigkeiten steht der in Bild 33 schraffierte Bereich in der Mitte des Produktionssystems zur Verfügung. Die Gründe für Störungen einzelner Stationen sind vielfältig. Beispiele hierfür sind Werkzeugbrüche, sinkende Prozessqualitäten oder fehlende Zuführteile. Zur Beseitigung der Störung werden stets Mitarbeiter benötigt, die mit Hilfe ihres Expertenwissens die jeweilige Störung möglichst schnell beheben. Hierbei ist neben der Dauer der reinen Störungsbeseitigung die

Verfügbarkeit der Mitarbeiter von entscheidender Bedeutung. Da Störungen zumeist nicht zyklisch auftreten, können über die Zeit deutliche Schwankungen im Mitarbeiterbedarf entstehen.

Während die Störungsbeseitigung und die zyklische Materialbereitstellung asynchron verlaufen können, müssen die Arbeitsschritte bei Rüstvorgängen aufeinander abgestimmt sein. Ein Rüstprozess wird durch einen Wechsel der zu fertigenden Produktvariante an der ersten Station, in Bild 33 Station So₁, gestartet. Abhängig von der zuvor gefertigten Produktvariante A müssen beim Rüsten auf die neue Produktvariante B verschiedene Stationen angepasst werden. Neben automatischen Anpassungen der Produktionsprozessparameter, können Werkzeugwechsel erforderlich sein, die manuell von Mitarbeitern durchzuführen sind. Bei den Stationen mit Montageprozessen fällt zeitgleich der Wechsel der Zuführteile an. Dieser besteht aus dem Leeren des aktuellen Bestands sowie dem Befüllen mit den neuen Zuführteilen für die neue Produktvariante B. Durch die Verkettung der Stationen wird der Rüstprozess sequenziell durchgeführt. Dies ermöglicht das zeitgleiche Rüsten einer Station, während der vorgelagerte Teil der Produktionslinie bereits die Produktvariante B und der nachgelagerte noch die Produktvariante A produziert. Für einen reibungslosen Durchlauf des Rüstprozesses müssen manuelle Rüsttätigkeiten und der Wechsel der Zuführteile aufeinander abgestimmt sein.

Automatisierte Produktionssysteme haben somit weiterhin Abhängigkeiten von manuellen Eingriffen. Vor allem im Ramp-down, in dem die sinkende Nachfrage einzelner Produktvarianten zu sinkenden Losgrößen bei gleichbleibender Variantenvielfalt führen, ist eine genaue Planung und koordinierte Durchführung entscheidend, um die Produktivität des Produktionssystems hochzuhalten. Die Produktivität eines Produktionssystems lässt sich mit diversen KPIs bewerten. Eine zentrale Kenngröße ist die Gesamtanlageneffektivität (engl. Overall Equipment Effectiveness, OEE). Sie lässt sich durch Multiplikation der Effektivität, Verfügbarkeit und Qualitätsrate berechnen. Sowohl Störungen als auch Rüstvorgänge haben Einfluss auf die Verfügbarkeit. Bei beiden werden manuelle Arbeitsschritte zum Rüsten oder zur Störungsbeseitigung benötigt. Gleichzeitig entstehen Wartezeiten bis zur Durchführung dieser Tätigkeiten, die aus der Verfügbarkeit der Mitarbeiter in Form von Laufwegen oder der Durchführung anderer Tätigkeiten entstehen. [36]

Daher lassen sich folgende, zentrale Aufgabenstellungen für die Planung und Durchführung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme

auf Basis ihrer Digitalen Zwillinge bei unveränderter Produktionssystemstruktur ableiten: die Bestimmung der rüstopimalen Produktionsreihenfolge zur Minimierung der Rüstaufwände und die damit verbundene Mitarbeiterereinsatzplanung. Falls die Produktion im Ramp-down im bestehenden automatisierten Produktionssystem nicht mehr rentabel ist, ist eine Bewertung der Rückbauprinzipien von AURICH ET AL. erforderlich [37].

5.2 Das ereignisdiskrete Simulationsmodell automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down

Die Materialflusssimulation (s. Bild 22) erlaubt die Abbildung gesamter Produktionssysteme. Sie eignet sich demnach für die Simulation des Materialflusses durch das Produktionssystem unter Beachtung stochastischer Einflüsse. Die Ergebnisse verschiedener Simulationsläufe können anhand gängiger produktionsbezogener KPIs bewertet und verglichen werden. Während der Detailgrad der 3D-Bewegungssimulation für die zuvor genannten zentralen Aufgaben in der Planung und Durchführung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme zu hoch ist, lassen sich die zu untersuchenden Wirkzusammenhänge innerhalb des Produktionssystems in einer übergeordneten Wirtschaftlichkeitssimulation nicht exakt abbilden. Daher wird in der vorliegenden Dissertation die ereignisdiskrete Materialflusssimulation zur Abbildung des automatisierten Produktionssystems gewählt. Das erforderliche ereignisdiskrete Simulationsmodell automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down wird im Folgenden gemäß des DTSM als zentrales Engineeringmodell detailliert beschrieben.

Bild 34 zeigt das im Simulationsmodell abzubildende Asset mit seiner Systemgrenze sowie den Eingangs- und Ausgangsgrößen. Wie im vorherigen Kapitel beschrieben, befindet sich die Systemgrenze an den Supermärkten des Produktionssystems. Dies hat zur Folge, dass Teilelager, Verpackungs- und Versandprozesse sowie die Intralogistik zum Produktionssystem nicht betrachtet werden. Als Eingangsgrößen dienen Produktionsdaten, die aus einem Planungsstand (Typ) oder dem realen Asset (Instanz) stammen. Die Ausgangsgrößen in Form von produktionsbezogenen KPIs stellen zumeist gleichzeitig die Zielvorgaben des realen Produktionssystems dar. Um die Produktivität des Produktionssystem möglichst hoch zu halten, werden abhängig vom Anwendungsfall (s. Kapitel 5.4) verschiedene Stellgrößen eingesetzt.

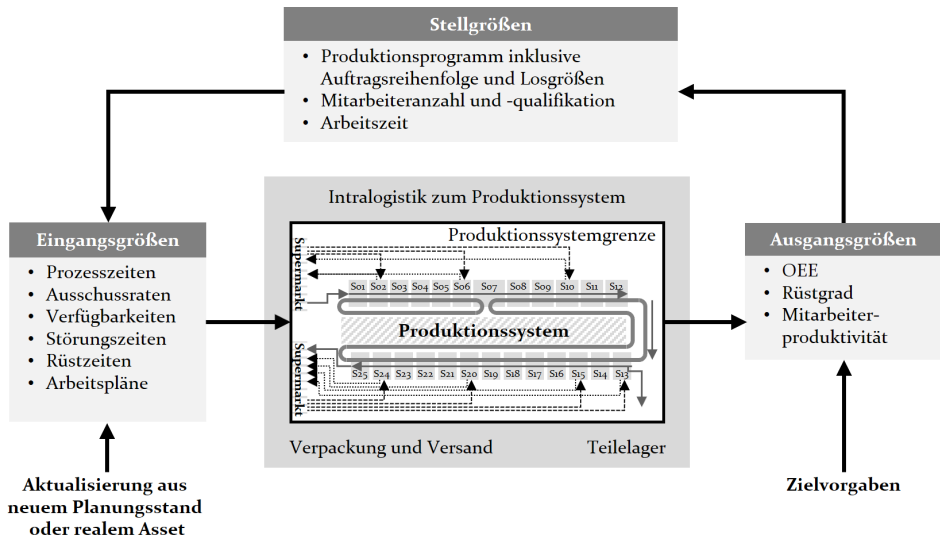


Bild 34: Automatisiertes Produktionssystem inklusive der Eingangs-, Ausgangs- und Stellgrößen in Anlehnung an [27]

Im Folgenden werden die für die Erstellung des Simulationsmodells erforderlichen Daten inklusive derer Quellen genauer beschrieben. Darauf aufbauend wird das Metamodell des Simulationsmodells des automatisierten Produktionssystems vorgestellt. Die Beschreibung des Simulationsmodells schließt mit der Erläuterung der bereitzustellenden KPIs.

5.2.1 Strukturdaten des Simulationsmodells

Die Grundlage des Simulationsmodells bilden Daten. Diese lassen sich gemäß der Strukturierung simulationsrelevanter Daten nach COLLISI einordnen. COLLISI unterteilt diese in die in Bild 35 dargestellten fünf Datenklassen. Für den grundlegenden Aufbau eines Modells werden die Strukturdaten, Daten der Datenklasse S, benötigt. Die Datenklasse A enthält Beschreibungen des dynamischen Verhaltens des Modells. Die Daten dieser Datenklassen können zumeist aus bestehenden Engineeringmodellen entnommen werden, weshalb sie im Folgenden genauer beschrieben werden. Die Ergebnisse der Experimente werden der Datenklasse E zugeordnet. Sie können wiederum als Eingangsgrößen für weitere Experimente verwendet werden. Die Parameter der Datenklasse P werden dem Digitalen Schatten zugeordnet. Diese werden im Kapitel 5.3 im Kontext des Digitalen Schattens weiter erläutert. Im Zuge der Betrachtung eines Digitalen Zwillings in der Planung eines neuen Produktionssystems werden die Daten der Datenklasse P in Form von Plandaten gewonnen, da kein Digitaler Schatten

existiert. Die für die Initialisierung und Durchführung von Experimenten benötigten Daten werden in der Datenklasse D gesammelt und in Kapitel 5.4 anhand der jeweiligen Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings genauer erläutert. [82]

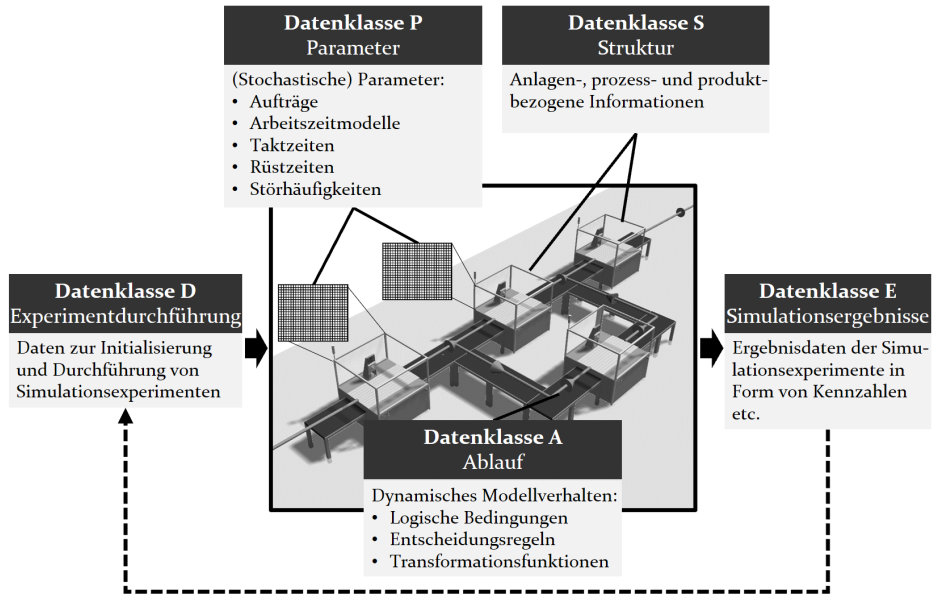


Bild 35: Strukturierung simulationsrelevanter Daten nach COLLISI in Anlehnung an [82]

Die Daten der Datenklasse S dienen zur grundlegenden Strukturbildung des Simulationsmodells. Sie umfassen anlagen-, prozess- und produktbezogene Informationen. [82] Im Kontext automatisierter Produktionssysteme gehört hierzu das Layout der geplanten oder vorhandenen Produktionsstätte. Dieses beinhaltet die genauen Positionen aller Einrichtungen. Darüber hinaus müssen die für die Mitarbeiter nutzbaren, freien Wege ersichtlich sein.

Zusätzlich zum Layout werden Übersichten der einzelnen Stationen inklusive der Arbeitspositionen innerhalb der Stationen sowie Pufferplätze benötigt. Diese beschreiben den Aufbau der Stationen sowie die Position der zur Entkopplung des Materialflusses eingebauten Puffer. Des Weiteren bedarf es einer Auflistung der individuellen Kapazitäten der Stationen sowie Puffergrößen. Zur Verbindung der Stationen sowie Puffer werden Transfersysteme eingesetzt. Die Zuordnung der Transfersysteme im Layout des Produktionssystems werden in einer Übersicht aller geplanten oder vorhandenen Transfersysteme dargestellt.

Werkstücke, fertige Produkte und Zuführteile werden in verschiedenen Gebinden transportiert. Hiervon werden die Gebindegrößen und deren Zuordnung zum jeweiligen Werkstück oder Zuführteil benötigt. Des Weiteren ist eine Unterscheidung zwischen einfach oder mehrfach genutzten Gebinden notwendig. Dies ist entscheidend für die spätere Abbildung notwendiger Leergutmaterialflüsse. Für den Transport der Gebinde werden je nach Größe und Gewicht weitere Transporthilfsmittel eingesetzt. Hier sind die Anzahl sowie die Zuordnung der eingesetzten Transporthilfsmittel je Gebindeart festzuhalten. Die Supermärkte werden anhand derer Position und Kapazitäten spezifiziert. Hierzu gehören die Anordnung der Gebinde innerhalb des Supermarkts sowie die Mindest- und Maximalbestände der einzelnen Gebinde.

Die beschriebenen Daten der Datenklasse S können verschiedenen Engineeringmodellen entnommen werden. Hierbei kann grundlegend zwischen den Lebenszyklusphasen Planung (Typ) und Betrieb (Instanz) unterschieden werden. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht gängiger Engineeringmodelle für die Daten der Datenklasse S. Im Falle der Datenbeschaffung in der Datenklasse S bei bereits bestehendem Produktionssystem, besteht die Möglichkeit der Begehung des Produktionssystems. Dabei müssen die notwendigen Daten beispielsweise durch Fotos oder Notizen erfasst und dokumentiert werden.

Tabelle 1: Übersicht gängiger Engineeringmodelle für die Daten der Datenklasse S aus Typ und Instanz

Daten der Datenklasse S	Engineeringmodelle in der Planung	Engineeringmodelle im Betrieb
Layout	Hallenlayout, Zeichnungen	Hallenlayout, Zeichnungen
Spezifikation der Stationen, Puffer und Transfersysteme	CAD-Modelle, Zeichnungen	CAD-Modelle, Zeichnungen, MES-Daten
Gebinde- und Transporthilfsmittelspezifikation	Zeichnungen, Prozessbeschreibungen	Zeichnungen, Prozessbeschreibungen, ERP-Daten
Supermarktspezifikation	Zeichnungen, Prozessbeschreibungen	Zeichnungen, Prozessbeschreibungen, ERP-Daten
Stücklisten der Produktvarianten	CAD-Modelle, Zeichnungen, Stückliste (engl. Bill of materials, BOM)	CAD-Modelle, Zeichnungen, BOM

Während des Betriebs kann das Layout des automatisierten Produktionssystems je nach Planungsstatus aus einem bestehenden Hallenlayout oder Zeichnungen und Skizzen entnommen werden. Hierbei ist die eindeutige Zuordnungsbarkeit der einzelnen Elemente des Produktionssystems im

Layout entscheidend. Eine Übersicht der Stationen, Puffer und Transportsysteme lässt sich im Typen aus vorhandenen CAD-Modellen oder Zeichnungen entnehmen. Auch hierbei muss auf deren Zuordenbarkeit zum zuvor aufgenommenen Layout geachtet werden. In der Instanz können neben der Begehung des Produktionssystems auch grundlegende Informationen über die Stationen aus einem MES abgeleitet werden. Hierzu stehen je nach Implementierung des MES Fahrtlisten einzelner Produkte zur Abbildung der Struktur des Produktionssystems zur Verfügung.

Die Daten der Gebinde, Transporthilfsmittel und Supermärkte können durch Zeichnungen oder Beschreibungen der Logistikprozesse erlangt werden. Wie bei der Stationsübersicht ist bei der Aufnahme der Supermarktdaten eine eindeutige Zuweisung der Supermärkte im Layout essenziell. In der Instanz können die benötigten Daten zusätzlich aus Enterprise Resource Planning Systemen (ERP) oder einer Vor-Ort-Begehungen erhoben werden.

Die Stücklisten (engl. Bill of Materials, BOM) der zu fertigenden Produkte inklusive der Produktvarianten liegen zumeist bereits als solche vor. Diese beinhalten die Zuordnung der einzelnen Zuführteile, die für die Produktion der jeweiligen Produktvariante benötigt werden. Sollte dies nicht der Fall sein, so können diese aus CAD-Modellen oder Zeichnungen abgeleitet werden. Falls die Produkte bereits physisch vorhanden sind, können diese auch analysiert werden, um die Produktstruktur zu erhalten.

Die Aufbereitung der Daten der Datenklasse S erfolgt außer beim Layout zumeist in Form von Tabellen und Listen, die in der anschließenden Erstellung des Simulationsmodells verwendet werden können. Das Layout sollte als CAD- oder Bilddatei für die anschließende Verwendung vorliegen. Bild 36 zeigt eine Übersicht der benötigten Daten automatisierter Produktionssysteme der Datenklasse S.

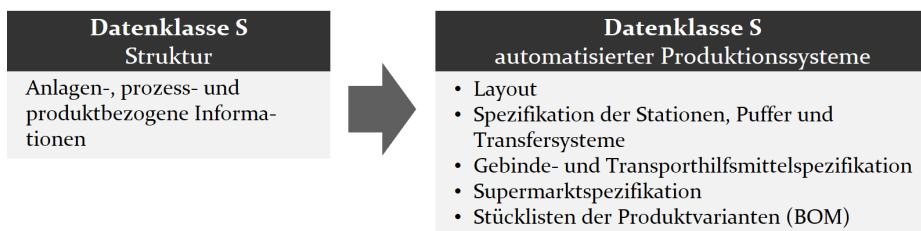


Bild 36: Übersicht der Daten automatisierter Produktionssysteme aus der Datenklasse S in Anlehnung an [82]

5.2.2 Ablaufdaten des Simulationsmodells

Die Datenklasse A beinhaltet die Logiken für den Materialfluss der Werkstücke im Produktionssystem [82]. Diese können sich je nach Produktvariante unterscheiden. Dies bedeutet, dass je nach Produktvariante verschiedene Stationen oder Arbeitspositionen und deren Produktionsprozesse durchlaufen werden können. Neben der variantenspezifischen Zu- und Abschaltung einzelner Stationen oder Arbeitspositionen beinhalten die Ablaufdaten die Logiken für die Verteilung der Werkstücke bei Parallelstationen sowie für die Aussteuerung von Ausschussteilen aus dem Produktionssystem.

Bild 37 zeigt Entscheidungspunkte für die Ansteuerung von Parallelstationen sowie für die Ausschussausschleusung. Der Entscheidungspunkt für die Aufteilung des Materialflusses bei Parallelstationen liegt vor den Parallelstationen. Die Aufteilung kann anhand verschiedener Strategien erfolgen. Die Zusammenführung des Materialflusses erfolgt hinter den Parallelstationen. Werden Parallelstationen aufgrund verschiedener Produktvarianten spezifisch durchlaufen, so muss diese Zuordnung bei der Zusammenführung beachtet werden. Die Ausschussausschleusung erfolgt nach einer Detektion mangelhafter Qualität durch einen Prüfprozess an einer Station. Die ausgeschleusten Werkstücke werden anschließend nachgearbeitet oder verschrottet.

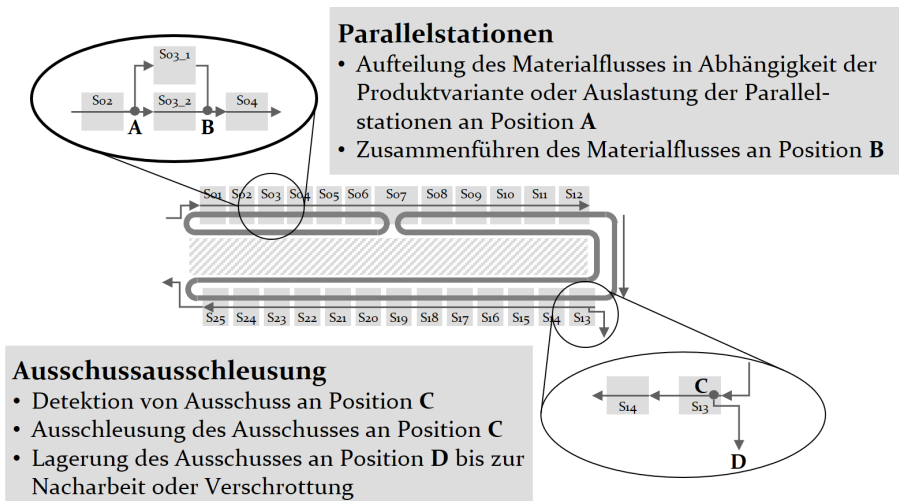


Bild 37: Entscheidungspunkte und Logiken bei Parallelstationen und Ausschuss

Neben den grundlegenden Ablauflogiken für Parallelstationen und Ausschuss ist im Ramp-down des Produktionssystems der Rüstablauf von entscheidender Bedeutung. Grundsätzlich beginnt der Rüstvorgang bei einem Wechsel der Produktvariante an der ersten Station, Station S₀₁, und wird sequenziell bis zum Ende des Produktionssystems, hier Station S₂₅, durchgeführt (s. Bild 33). Für das Durchführen des Rüstvorgangs bestehen verschiedene Strategien. In automatisierten Produktionssystemen können einzelne Stationen häufig den Wechsel der Produktvariante automatisiert erkennen, sodass einzelne Parameter der Produktionsprozesse automatisiert angepasst werden. Dieser Vorgang wird als automatisches Rüsten bezeichnet. Neben der automatisierten Erkennung können separate Werkstückträger für das Rüsten, sogenannte Rüst-WT, in den Materialfluss eingeschleust werden. Des Weiteren können für das Wechsel von Werkzeugen manuelle Eingriffe notwendig sein.

Aus Sicht der Ablauflogik der Datenklasse A sind die notwendigen Werkzeugwechsel von einer Produktvariante zu einer anderen je Station relevant. Diese bestimmen, ob ein automatisches Rüsten vorliegt oder ob manuelle Eingriffe durch einen Mitarbeiter notwendig sind. Zusätzlich zum Werkzeugwechsel an den Stationen müssen abhängig vom Produktvariantenwechsel auch die notwendigen Zuführteile an den Montagestationen ausgetauscht werden. Die Abfolge der Produktvarianten im Produktionsplan ist somit entscheidend für den Ablauf der auftretenden, manuellen fertigungsbezogenen sowie logistischen Tätigkeiten der Mitarbeiter beim Rüstprozess.

Der reguläre Ablauf der Produktion in automatisierten Produktionssystemen ist geprägt von automatisierten Produktionsprozessen sowie einem größtenteils automatisierten Teiletransport zwischen den Stationen. Werden im Zuge des Ramp-downs jedoch strukturelle Anpassungen am Produktionssystem vorgenommen, so können durch Anwendung der Rückbauprinzipien nach AURICH ET AL. teilautomatisierte oder manuelle Produktionssysteme entstehen [37].

Bild 38 zeigt die Auswirkungen des Automatisierungsgrads auf das Produktionssystem mit Fokus auf dem Produktionsablauf. Durch einen geringeren Automatisierungsgrad wird der Produktionsablauf durch den zunehmenden manuellen Teiletransport verstärkt vom Mitarbeiter geprägt. Hierdurch entstehen zunehmende Abweichungen im Ablauf, da das Mitarbeiterverhalten im Vergleich zu einer Maschine nicht eindeutig vorhersehbar ist. Der gleiche Effekt ist bei der Zunahme von manuell durchzuführenden

Rüstprozessen in einem automatisierten Produktionssystem im Ramp-down festzustellen.

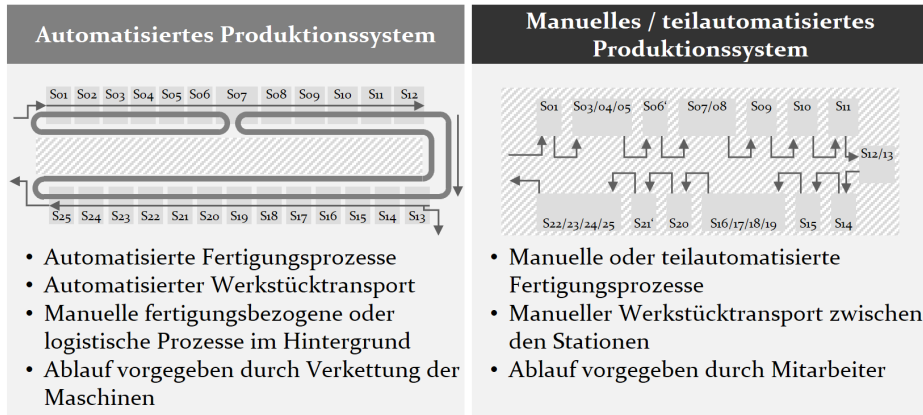


Bild 38: Gegenüberstellung automatisierter und manueller bzw. teilautomatisierter Produktionssysteme

Neben der Spezifikation des Produktionsablaufes wird die Beschreibung der Versorgung der Produktionslinie mit den benötigten Zuführteilen benötigt. Hierzu zählen Belieferungsstrategien der einzelnen Stationen inklusive der hierfür verwendeten Gebinde, Transporthilfsmittel sowie dem benötigten Personal.

Die Ablaufdaten der Datenklasse A liegen in Form eines Arbeitsplans, als Ablauflisten oder als Programmcode der speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) vor. Für die weitere Verwendung in der Modellierung werden die Abläufe in maschinell lesbaren Ablaufdiagrammen aufbereitet. Hierfür eignet sich beispielsweise die Notation in Petri-Netzen der Fundamental Modeling Concepts (FMC) [83].

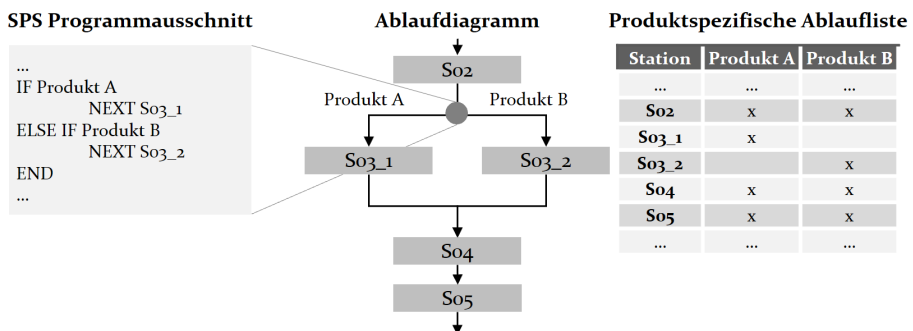


Bild 39: Beispielhafte Zusammenführung von SPS-Programmausschnitten (links) und produktspezifischen Ablauflisten (rechts) zu einem Ablaufdiagramm

Bild 39 zeigt eine beispielhafte Zusammenführung eines SPS-Programmausschnitts sowie eines Ausschnitts einer produktspezifischen Ablaufliste zu einem Ablaufdiagramm. Die Ablaufliste stellt den grundlegenden Durchlauf der Produkte durch das Produktionssystem bereit. In besonderen Fällen, wie beispielsweise dem Rüsten, ist es möglich, dass der Rüstablauf nicht in einer der genannten Formen vorliegt. Hierfür muss eine detaillierte Analyse der Verteilentscheidungen aus dem jeweiligen SPS-Programm erfolgen. Neben dem regulären, produktbezogenen Produktionsablauf bedarf es der Darstellung der Ausschussausschleusung, der Rüstabläufe sowie der Belieferung der Stationen mit Zuführteilen in standardisierten Ablaufdiagrammen. Bild 40 zeigt abschließend eine Übersicht der benötigten Daten der Datenklasse A.

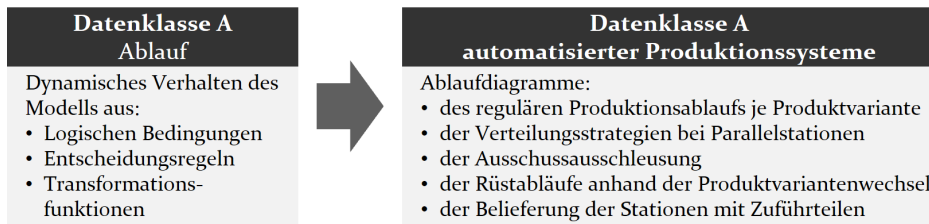


Bild 40: Übersicht der Daten automatisierter Produktionssysteme aus der Datenklasse A in Anlehnung an [82]

5.2.3 Metamodell des Simulationsmodells automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down

Die zuvor beschriebenen Daten der Datenklasse S werden in einem Simulationsmodell zusammengeführt. Dieses soll automatisierte Produktionssysteme inklusive Ramp-down spezifischer Eigenschaften abbilden. Gleichzeitig sollen die einzelnen Elemente des Modells gemäß Forschungsfrage F2 wiederverwendbar sein. Daher erfolgt die Modellierung anhand einer vorgegebenen Struktur, dem Metamodell des Simulationsmodells automatisierter Produktionssysteme.

LÜTJEN stellt in seiner Dissertation ein Metamodell für die Planung und Simulation von Produktionsszenarien am Beispiel der Serienfertigung von carbonfaserverstärkten Kunststoffen vor [84]. Dieses lässt sich auch für die Modellierung automatisierter Produktionssysteme anwenden, indem es um Elemente, die für automatisierte Produktionssysteme sowie für die Abbildung des Ramp-downs spezifisch sind, erweitert wird. Bild 41 zeigt das um die Elemente Station, Stationssteuerung sowie Rüstprozess erweiterte und angepasste Metamodell in der Unified Modeling Language (UML).

Dieses wird im Folgenden in Anlehnung an LÜTJEN genauer erläutert. Hierbei inkludiert in diesem Kontext der Begriff der Fertigung auch über den Bereich der Fertigung hinausgehende Produktionsprozesse.

Initial sorgt der Zeitgeber für die Auslösung von einem oder mehreren Aufträgen im sogenannten Auftragsauslöser. Die Auslösung im Zeitgeber erfolgt hierbei anhand von vorgegebenen Zeitpunkten oder Methoden. Ein ausgelöster Prozessauftrag ist stets einem Prozess zugeordnet. Prozesse können Fertigungs-, Logistik- oder Rüstprozesse sein. Letztere wurden im Metamodell aufgrund deren Stellenwerts und notwendiger Ausdetaillierung im Ramp-down hinzugefügt. Diese Prozesse können mit Hilfe mehrerer Vorgänge genauer detailliert werden. Gleichzeitig sind sie Teil einer übergeordneten Prozessfolge. Die reflexive Assoziation der Prozesse zeigt an, dass mehrere Prozesse sowohl parallel stattfinden als auch sequenziell ablaufen können. Einem einzelnen Prozess können mehrere Fertigungsfehler zugeordnet werden. So können einzelne Fehlerausprägungen eines einzelnen Fertigungsprozesses inklusive der Auftretungswahrscheinlichkeiten einzeln spezifiziert werden. [84]

Fertigungselemente bilden die Basis für die weitere Modellierung. Ein Fertigungselement kann Material, Produkt, Betriebsmittel, Betriebshilfsmittel oder Personal sein. Die Stückliste spezifiziert, aus welchen Komponenten das Produkt aufgebaut ist. Fertigungselemente werden für die Detaillierung von Materialflussobjekten und Organisationseinheiten verwendet. [84]

Materialflussobjekte ermöglichen den Transport zwischen einzelnen Prozessen. Ihre Zuordnung zu einzelnen Fertigungselementen erlaubt die genauere Beschreibung dieser, indem diese durch einzelne Betriebs- und Betriebshilfsmittel genauer spezifiziert werden. Materialflussobjekte können in Puffern gespeichert werden. Diese werden durch die Angabe der angewandten Pufferstrategien sowie der vor- und nachgelagerten Prozesse spezifiziert. [84]

Einzelne oder mehrere Prozesse können auf einer Organisationseinheit durchgeführt werden. Diese können Fertigungs-, Montage-, Umschlag-, Transport-, Lager- oder Qualitätseinheiten sein. Die Ausdetaillierung der Organisationseinheiten erfolgt durch die Allokation einzelner Fertigungselemente. [84] Mehrere Organisationseinheiten werden zu der neuen Klasse Station zusammengefasst. Diese erlaubt die Parametrierung und Steuerung mehrerer Organisationseinheiten durch genau eine Stationssteuerung. Das Layout wird infolgedessen zur weiteren Spezifikation der

Für die Erstellung von Simulationsmodellen existieren, wie in Unterkapitel 3.1.2 beschrieben, bereits etablierte Vorgehensmodelle [59]. In Kapitel 6 wird im Zuge der Methode des Einsatzes des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme die Vorgehensweise zur Modellerstellung beschrieben. Bei der Datensammlung wird auf den zuvor beschriebenen Datenquellen aufgebaut. Neben dem initialen Aufbau des Simulationsmodells besteht die Möglichkeit, vereinzelt untersuchungsbedingte Anpassungen vorzunehmen. Auch hierbei ist gemäß dem zuvor angewandten Vorgehensmodell vorzugehen. Ein besonderer Fokus liegt bei sämtlichen Anpassungen auf der anschließenden Verifikation und Validierung des Simulationsmodells.

5.2.4 Produktionsbezogene Kennzahlen im Simulationsmodell

Zur Bewertung des Betriebs automatisierter Produktionssysteme werden, wie in Unterkapitel 2.1.3 beschrieben, KPIs verwendet. Dementsprechend müssen diese vom Simulationsmodell als Ergebnisdaten bereitgestellt werden. Gemäß der Einordnung simulationsrelevanter Daten nach COLLISI entsprechen diese der Datenklasse E [82]. Bild 42 zeigt die für die Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme relevanten KPIs. Demzufolge sind für die Produktion im Ramp-down neben der OEE, der Rüstgrad sowie die Mitarbeiterproduktivität entscheidend. Im Folgenden werden deren Zusammensetzung und Berechnung genauer erläutert.

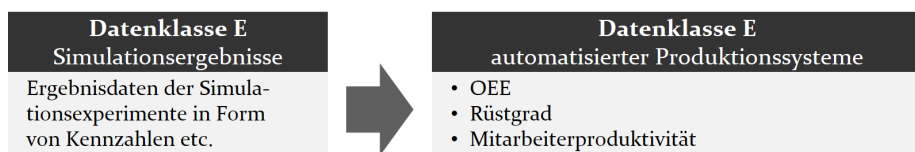


Bild 42: Übersicht der Daten automatisierter Produktionssysteme aus der Datenklasse E in Anlehnung an [82]

Für die Berechnung von Kenngrößen, die sich auf einzelne Produktionseinheiten wie Stationen oder Produktionslinien beziehen, werden die in Bild 43 dargestellten Zeitachsen zugrunde gelegt. Dabei werden ausgehend von einem Kalendertag die Plan- und die Istzeiten bis zur Hauptnutzungszeit heruntergebrochen.

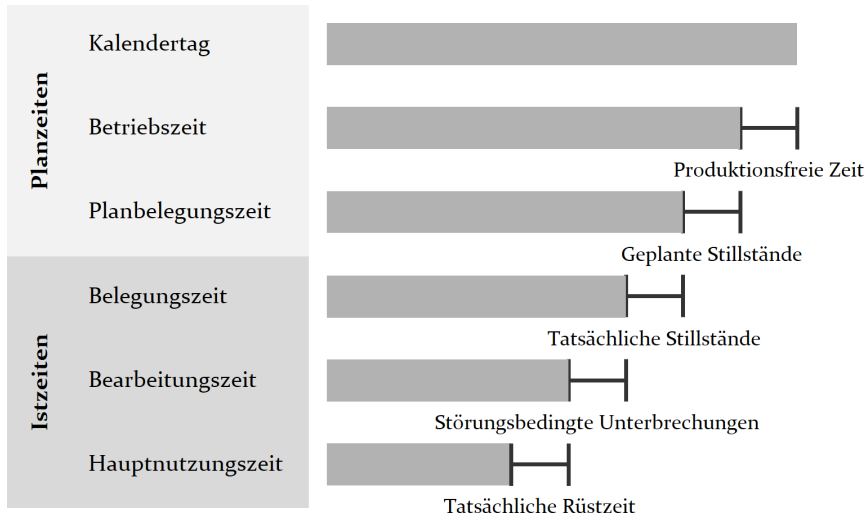


Bild 43: Zeitachsen für die Berechnung produktionsbezogener KPIs in Anlehnung an [36]

Die OEE als erste Kennzahl berechnet sich wie folgt: [36]

$$OEE [\%] = \text{Verfügbarkeit} [\%] \times \text{Effektivität} [\%] \times \text{Qualitätsrate} [\%] \quad (1)$$

Dabei ist grundsätzlich eine möglichst hohe OEE anzustreben. Die Faktoren Verfügbarkeit, Effektivität und Qualitätsrate berechnen sich folgendermaßen: [36]

$$\text{Verfügbarkeit} [\%] = \frac{\text{Hauptnutzungszeit} [s]}{\text{Planbelegungszeit} [s]} \quad (2)$$

$$\text{Effektivität} [\%] = \frac{\text{geplante Taktzeit} [s] \times \text{produzierte Menge} [\text{Stück}]}{\text{Hauptnutzungszeit} [s]} \quad (3)$$

$$\text{Qualitätsrate} [\%] = \frac{\text{Gutmenge} [\text{Stück}]}{\text{produzierte Menge} [\text{Stück}]} \quad (4)$$

Die Verfügbarkeit beschreibt, zu welchem Anteil die Produktionseinheit für reale Wertschöpfung in Bezug auf deren geplante Nutzung eingesetzt wird. Die Effektivität ist ein Maß für die Leistung einer Produktionseinheit

und zeigt den Grad der Effektivität in der Hauptnutzungszeit einer Produktionseinheit an. Die Qualitätsrate beinhaltet den Einfluss von Ausschussteilen, indem sie aus dem Verhältnis der gefertigten Gutteile und der insgesamt produzierten Menge an Teilen berechnet wird. Auf Basis dieser stellt die OEE die zentrale Kennzahl für den Wirkungsgrad einer Produktionseinheit dar. [36]

Die zweite für die Analyse der Ramp-downs bereitzustellende Kennzahl ist der Rüstgrad. Dieser stellt dar, wie hoch der Anteil der für das Rüsten benötigten Zeit im Verhältnis zur Bearbeitungszeit einer Maschine ist. Für eine hohe Produktivität und somit hoher OEE des Produktionssystems sollte der Rüstgrad möglichst gering sein. Er berechnet sich wie folgt: [36]

$$\text{Rüstgrad [\%]} = \frac{\text{Tatsächliche Rüstzeit [s]}}{\text{Bearbeitungszeit [s]}} \quad (5)$$



Bild 44: Zeitmodell zur Berechnung der Mitarbeiterproduktivität in Anlehnung an [36]

Für die Berechnung der dritten Kennzahl, der Mitarbeiterproduktivität, wird im Vergleich zu den produktionseinheitsbezogenen Kenngrößen ein weiteres Zeitmodell benötigt. Bild 44 zeigt das Zeitmodell zur Berechnung der Mitarbeiterproduktivität, die sich wie folgt berechnet: [36]

$$\text{Mitarbeiterproduktivität [\%]} = \frac{\text{Arbeitszeit [s]}}{\text{Gesamtanwesenheitszeit [s]}} \quad (6)$$

Die Mitarbeiterproduktivität sagt aus, wie effektiv der Arbeitskräfteeinsatz ist. Mögliche Störeinflüsse, die die Arbeitszeit verringern, können ungeplante Transportwege sein. [36]

Neben den drei dargestellten KPIs existiert eine Reihe weiterer, standardisierter KPIs, die es ermöglichen, quantitative Aussagen über den Zustand von Produktionssystemen zu treffen. Dazu gehören beispielsweise der technische Nutzungsgrad oder der Ausschussgrad. Im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme liegt der Fokus jedoch auf rüstopimaler Produktion und der passenden Zuordnung der Mitarbeiter zu den manuellen Tätigkeiten. Daher sind die drei vorgestellten KPIs entscheidend für die

Bewertung der Performance des Produktionssystems im Ramp-down. Weitere, gängige KPIs können dem VDMA-EINHEITSBLATT 66412-1 entnommen werden. [36]

5.3 Der Digitale Schatten

Gemäß seiner Definition bildet der Digitale Schatten die Datengrundlage für die Auswertung aller produktionsrelevanten Daten [55]. In den folgenden Unterkapiteln wird diese im Kontext des Digitalen Zwillings im Ramp-down genauer spezifiziert. Hierbei stehen die potentiellen Datenquellen in automatisierten Produktionssystemen sowie deren Aufbereitung und Speicherung im Fokus.

5.3.1 Daten des Digitalen Schattens

Wie in Bild 35 dargestellt, lassen sich die Parameter der Datenklasse P dem Digitalen Schatten zuordnen, da diese größtenteils aus den realen Produktionsdaten entnommen werden können. Die Daten der Datenklasse P bestehen aus verschiedenen Parametern, die im Folgenden beschrieben werden. Ausgangspunkt für die Produktion stellt das Produktionsprogramm dar. Es beschreibt, in welcher Reihenfolge welche Produktvariante in welcher Losgröße gefertigt werden soll. Diese Reihenfolge sowie die dazugehörigen Losgrößen sind Ergebnisse der PPS. Gemäß des in Datenklasse A definierten Ablaufs durchlaufen die einzelnen Werkstücke die Produktion und werden hierbei auf den Stationen mit verschiedenen Produktionsprozessen bearbeitet. Für das Simulationsmodell des automatisierten Produktionssystems im Ramp-down sind hierbei die variantenabhängigen Prozess- und Taktzeiten von Bedeutung. Einzelne Produktionsprozessparameter, wie zum Beispiel Einpresskräfte, werden nicht benötigt, da diese für die Materialflussbetrachtung nicht notwendig sind.

Eine weitere Parametergruppe der Datenklasse P stellen die Verfügbarkeiten einzelner Produktionsprozesse je nach Produktvariante dar. Zusätzliche Einflüsse auf die Verfügbarkeit, wie fehlendes Material oder Stauverhalten, werden nicht als Eingangsgröße benötigt, da diese durch die Simulation ermittelt werden. Für die spätere Abbildung der Störungsbeseitigung bedarf es der für die manuelle Störungsbehebung benötigten Zeiten je Produktionsprozess. Neben den Verfügbarkeiten werden fertigungsprozessbezogene Ausschussraten je Produktvariante benötigt. Die Ausschussrate beschreibt, wie viele Werkstücke in einem definierten Zeitraum die Qualitätskriterien eines Produktionsprozesses nicht erfüllt haben und somit

nicht weiterbearbeitet, sondern ausgeschleust werden (s. Bild 37 Ausschussausschleusung).

Bei den durch das Produktionsprogramm vorgegebenen Produktwechseln fallen in Abhängigkeit der Paarung der Produktvarianten unterschiedliche Rüsttätigkeiten an. Während im Serienbetrieb die Rüsttätigkeiten im Vergleich zu den Produktionsprozessen eine untergeordnete Rolle spielen, erhalten sie, wie in Unterkapitel 5.1.2 beschrieben, im Ramp-down eine größere Bedeutung. Daher genügen für die Simulation keine Abschätzungen für Rüstzeiten, sondern es werden für jede Station je Produktvariantenpaarung spezifische Rüstzeiten benötigt. Die Rüstzeiten können auf verschiedenen Wegen aufgenommen werden. Diese werden in Unterkapitel 5.3.3 genauer beschrieben.

Die letzten Parameter der Datenklasse P beinhalten die manuellen Tätigkeiten im Produktionssystem. Hierfür werden die Anzahl der Mitarbeiter sowie deren Qualifikation benötigt. Hierbei kann zwischen fertigungsbezogenen und logistischen Qualifikationen einzelner Mitarbeiter unterschieden werden. Eine weitere Detaillierung des individuellen Qualifikationsprofils einzelner Mitarbeiter auf Rüsttätigkeiten oder Störungsbeseitigungen kann für einzelne Anwendungen erforderlich sein. Bild 45 zeigt eine Übersicht der aus Datenklasse P benötigten Daten für den Digitalen Schatten automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down.

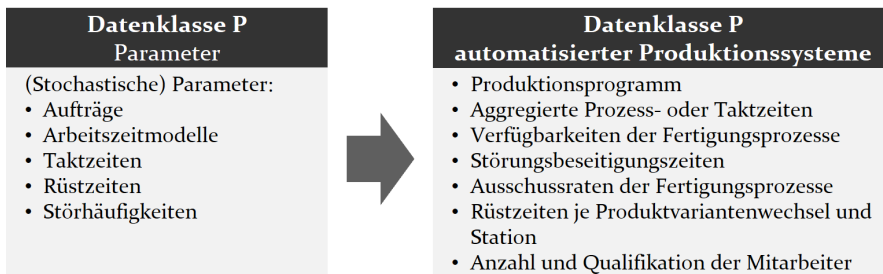


Bild 45: Übersicht der Daten automatisierter Produktionssysteme aus der Datenklasse P in Anlehnung an [82]

5.3.2 Datenquellen des Digitalen Schattens

Die für den Digitalen Schatten notwendigen Daten der Datenklasse P können aus verschiedenen Datenquellen stammen. Durch den hohen Automatisierungsgrad der in dieser Dissertation betrachteten automatisierten Produktionssysteme kann von einer digitalen Verfügbarkeit eines Großteils der notwendigen Daten ausgegangen werden. Diese werden von Systemen

aus verschiedenen Ebenen der Automatisierungspyramide zur Verfügung gestellt. Die Automatisierungspyramide ist nach SIEPMANN in sechs Ebenen unterteilt, denen jeweils spezifische Aufgaben der Datenerhebung und -verarbeitung zugeteilt sind [85]. Bild 46 zeigt die Automatisierungspyramide inklusive zugeordneter Daten der Datenklasse P.

Die unterste Ebene wird auch als Prozessebene bezeichnet, da sie die realen Produktionsprozesse beinhaltet [85]. Grundsätzlich lässt sich ein Großteil der Daten der Datenklasse P manuell durch Beobachtungen auf dieser Ebene erfassen, falls diese auf den anderen Ebenen nicht digital zur Verfügung gestellt werden. Die Feldebene, Ebene 1, beinhaltet Feldgeräte wie Sensoren und Aktoren, die wiederum die Daten der Produktionsprozesse als Ein- und Ausgangssignale bereitstellen [85]. Für den Digitalen Schatten zur späteren Anwendung in einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation ist der Aggregationsgrad der Daten dieser Ebene zumeist unpassend. Daher lassen sich hier keine der notwendigen Daten zuordnen.

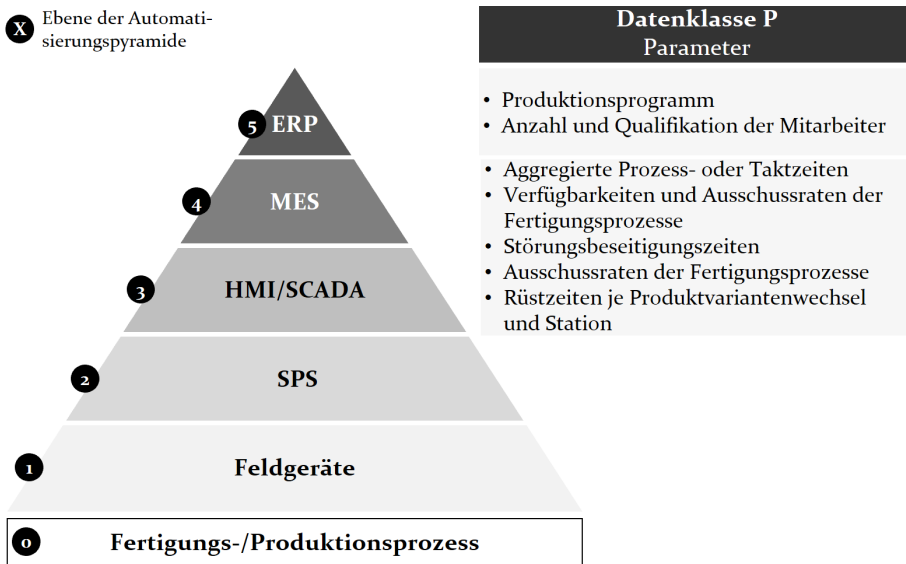


Bild 46: Einordnung der Daten aus der Datenklasse P anhand ihrer Datenquellen aus der Automatisierungspyramide in Anlehnung an [85, P4]

Ebene 2, die Steuerungsebene, nutzt SPS, um Sensordaten aus der Feldebene auszuwerten und darauf basierend Ergebnisdaten zurückzusenden, wo sie von Aktoren umgesetzt werden. In der darüberliegenden Prozessleitebene werden die Produktionsprozesse dem Anwender oder Maschinenbediener mit Hilfe von Bildschirmen, auch Human Machine Interface (HMI) oder Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) genannt,

visualisiert. MES werden in der Betriebsebene, Ebene 4, eingesetzt, um Produktionsdaten zu erfassen. Sie verbindet die darunterliegenden Ebenen mit der übergeordneten Unternehmensebene. [85] Aus dieser Ebene kann der Großteil der Daten der Datenklasse P entnommen werden. Im Normalfall werden im MES alle Produktionsdaten, wie Prozess-, Takt- und Rüstzeiten sowie Ausfallraten, Verfügbarkeiten und Zeiten, für die Störungsbeseitigung bereitgestellt. Vereinzelt können die Datenpunkte auch an einem HMI (Ebene 3) abgelesen werden.

Die oberste Ebene, die Unternehmensebene, beinhaltet ein ERP-System mit dessen Hilfe die grobe Produktionsplanung sowie das Bestellmanagement abgewickelt werden [85]. Hier können das Produktionsprogramm sowie die Anzahl und Zuordnung der Mitarbeiter entnommen werden. Letztere werden zumeist in Form eines Schichtplans zur Verfügung gestellt.

Im Zuge der Industrie 4.0 wird die Hierarchie der Automatisierungspyramide sukzessiv durch den Einsatz dezentraler Dienste aufgelöst [86]. Hierdurch soll die Performance der Datenübertragung und -verarbeitung im Vergleich zur hierarchischen Abarbeitung der einzelnen Stufen der Automatisierungspyramide gesteigert werden [85]. Die Auflösung der Automatisierungspyramide ist in Bild 47 dargestellt.

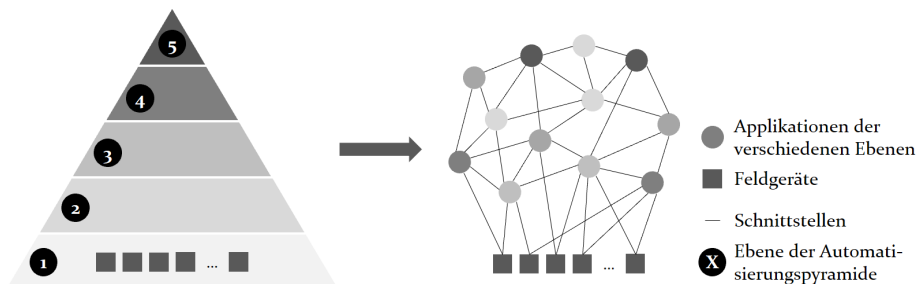


Bild 47: Auflösung der Automatisierungspyramide in Anlehnung an [86]

Bereits heute werden sogenannte Data Warehouses zur zentralen Sammlung und Speicherung von Produktionsdaten aus verschiedenen Datenquellen eingesetzt, die eine zentrale Abfrage der Daten, losgelöst von den einzelnen Ebenen der Automatisierungspyramide, ermöglichen sollen. Zukünftig besteht die Möglichkeit, dass die Daten der Datenklasse P durch spezialisierte, dezentrale Dienste abgerufen werden können. Durch den direkten Zugriff dieser Dienste auf die Produktionsprozesse ist von einer schnelleren Abrufgeschwindigkeit im Gegensatz zur hierarchischen Abarbeitung der Stufen der Automatisierungspyramide auszugehen. Dies ermöglicht eine höhere Aktualisierungsfrequenz des Digitalen Schattens und somit neue Anwendungsgebiete des zugehörigen Digitalen Zwillings.

5.3.3 Datenaufbereitung

Die Form der im vorherigen Unterkapitel beschriebenen Daten entspricht zumeist nicht den Anforderungen für die spätere Verwendung im Simulationsmodell, sodass diese aufbereitet werden müssen. Eine Ausnahme hiervon stellt das Produktionsprogramm dar. Dieses kann als Liste mit den Spalten Produktvariante und Losgröße extrahiert werden. Der Ablauf des Produktionsprogramms ergibt sich durch die Aneinanderreihung der Aufträge in der Liste. Im Folgenden werden die grundlegenden Aufbereitungsschritte der weiteren Daten der Datenklassen P vorgestellt.

Die vom MES bereitgestellten Takt- oder Prozesszeiten können je nach Implementierung für den abgerufenen Zeitraum bereits als aggregierte Mittelwerte mit einer Verteilung oder als Einzelwerte zur Verfügung gestellt werden. Für den späteren Einsatz in einer ereignisdiskreten Materialflusssimulation muss einheitlich zwischen Prozess- und Taktzeiten unterschieden werden. Bild 48 zeigt die Zusammensetzung der Taktzeit. Die Taktzeit ist die Zeit von einem produzierten Produkt einer Station bis zum nächsten produzierten Produkt. Die Prozesszeit einer Station hingegen ist lediglich die Zeit, die der reine Produktionsprozess in Anspruch nimmt. Je nach geplantem Abstraktionsgrad der Modellierung sind die beiden Zeiten nicht gleichzusetzen, da die Zeiten der Handhabungsprozesse zum Produktionsprozess und zurück sowie Warte- und Stauzeiten Einfluss auf die Taktzeit nehmen. Wartezeiten entstehen durch fehlende Werkstücke vor dem Produktionsprozess, Stauzeiten durch Stau hinter dem Produktionsprozess. Beide Zeiten sind Ergebnisse des Materialflusses und werden daher in den meisten Fällen simuliert. Deshalb ist stets auf davon bereinigte Prozess- oder Taktzeiten zurückzugreifen. Sind diese nicht im MES hinterlegt und es ist bekannt, dass Stau- und Wartezeiten an der Station von großem Einfluss sind, empfiehlt sich eine manuelle Aufnahme der Prozesse.

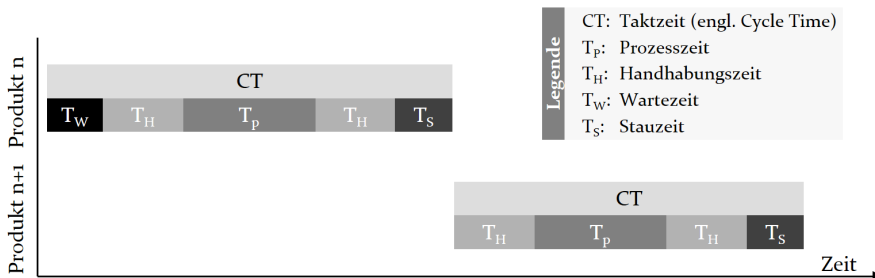


Bild 48: Zusammensetzung der Taktzeit auf Basis der Prozess-, Handhabungs- und Stauzeiten

Falls die bereinigten Takt- oder Prozesszeiten nicht in aggregierter Form, sondern als Einzelwerte vorliegen, wird deren Mittelwert über den abgerufenen Zeitraum inklusive einer dazugehörigen Verteilung berechnet, da gängige Simulationsprogramme für die ereignisdiskrete Materialflusssimulation das stochastische Verhalten abbilden können. Die Vernachlässigung schwankender Prozesszeiten kann Auswirkungen auf die Aussagekraft des Simulationsmodells haben, weshalb das stochastische Verhalten stets mit abgebildet werden sollte.

Ausschussraten können auf verschiedenen Ebenen dargestellt werden. Für eine möglichst genaue Abbildung des Verhaltens sollten die Ausschussraten je Produktionsprozess betrachtet werden. Falls diese nicht durch das MES bereitgestellt werden, lassen sie sich für jeden Produktionsprozess im betrachteten Zeitraum einzeln berechnen:

$$\begin{aligned} & \text{Ausschussrate je Prozess [\%]} \\ &= \frac{\text{Ausschussteile [Stück]}}{\text{Gutteile [Stück]} + \text{Ausschussteile [Stück]}} \end{aligned} \quad (7)$$

Bei stark schwankenden Ausschussraten je Produktvariante kann eine separate Berechnung der Ausschussraten je Produktvariante sinnvoll sein.

Störungsbedingte Ausfallzeiten einzelner Stationen sollten je Station mittels einer prozentualen Verfügbarkeit der Station sowie einer dazugehörigen durchschnittlichen Zeit zur Störungsbeseitigung (engl. Mean Time to Repair, MTTR) abgebildet werden. Die Verfügbarkeit wird gemäß Formel (2) berechnet. Die MTTR berechnet sich wie folgt:

$$MTTR [s] = \frac{\text{Summe der Stillstandszeiten [s]}}{\text{Anzahl der Stillstände [Stück]}} \quad (8)$$

Bei der Übernahme der Verfügbarkeit und MTTR aus einem MES muss auf deren spezifische Implementierung geachtet werden. Wie auch die Taktzeit beinhaltet die MTTR, wie in Bild 49 dargestellt, eine Wartezeit. Bei manueller Störungsbeseitigung, wie sie auch in automatisierten Produktionssystemen anzutreffen ist, entsteht diese Wartezeit durch eine mangelnde Verfügbarkeit der Mitarbeiter zur Störungsbeseitigung oder deren Weg zur in Störung befindlichen Station. Da bei Abbildung der Mitarbeiter in der Materialflusssimulation deren Laufwege beachtet werden, müssen die störungsbedingten Ausfallzeiten der Stationen ohne mitarbeiterabhängige Wartezeiten aufbereitet werden. Dies bedeutet, dass die reinen Störungsbeseitigungszeiten in Form eines Mittelwerts inklusive Verteilung

über den betrachteten Zeitraum aufbereitet werden muss. Falls diese Zeiten nicht über das MES bereitgestellt werden, lassen sich diese durch eine Analyse von Stationsprotokollen berechnen.

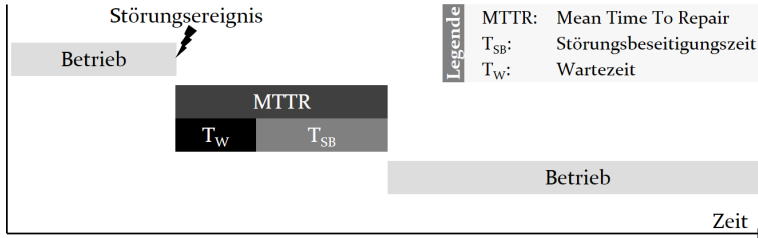


Bild 49: Zusammensetzung der MTTR aus Warte- und Störungsbeseitigungszeit

Bei einem Wechsel von einer Produktvariante auf eine andere können, wie in Unterkapitel 5.3.1 beschrieben, Rüstvorgänge an einzelnen Stationen notwendig sein. Die theoretisch mögliche Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten bei n_p Produktvarianten je Station lässt sich wie folgt berechnen:

$$\text{Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten} = \frac{n_p!}{(n_p - 2)! \times 2!} \quad (9)$$

Bei einer Anzahl von 80 Produktvarianten ergeben sich somit bereits 3160 Kombinationsmöglichkeiten je Station, zwischen denen theoretisch unterschieden werden kann. Da in vielen Fällen nicht jeder Produktvariantenwechsel an jeder Station benötigt wird, lässt sich die Anzahl notwendiger Rüstvorgänge reduzieren.

Zur besseren Übersichtlichkeit bietet sich die Abbildung der notwendigen Rüstprozesse in einer Rüstmatrix je Station an. Bild 50 stellt eine Rüstmatrix für vier Produktvarianten beispielhaft dar. In der Rüstmatrix werden die Produktvarianten an beiden Achsen aufgetragen. Ein X in der Matrix zeigt, dass bei dem Wechsel von der Produktvariante der Zeile auf die der Spalte ein Rüstvorgang notwendig ist und steht hier für eine spezifische, von dem Wechsel der Produktvarianten abhängige Rüstzeit. Somit muss bei Station S₀₁ bei einem Wechsel von Produktvariante B auf D gerüstet werden. Dabei ist es für die resultierende Rüstzeit irrelevant, ob von Produktvariante B auf D oder von D auf B gewechselt wird. Es ergibt sich somit eine symmetrische Rüstmatrix. Die Erfassung produktvariantenwechselspezifischer Rüstzeiten je Station ist notwendig, um rüstopoptimale Produktionsprogramme, wie sie im Ramp-down notwendig sind, zu bestimmen.

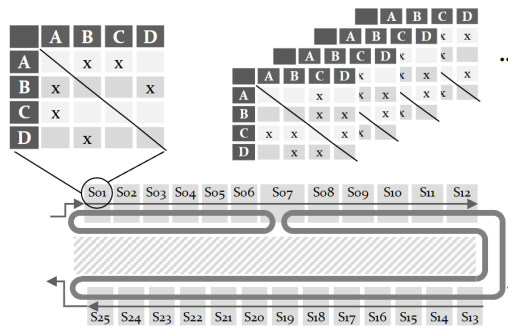


Bild 50: Beispielhafte Darstellung von Rüstmatrizen der Produktvarianten A bis D für jede Station

Die vom MES bereitgestellten Rüstzeiten starten mit dem Auslösen des Rüstprozesses durch die Detektion eines Produktvariantenwechsels, dem sogenannten Rüstereignis, und enden mit der Wiederaufnahme des Betriebs. Bild 51 zeigt die Zusammensetzung der Rüstzeit. Sobald manuelle Tätigkeiten beim Rüsten erforderlich sind, besteht diese wiederum aus einer Wartezeit sowie der reinen Rüstzeit, in der der Mitarbeiter den Rüstvorgang an der Station durchführt. Bei einer angestrebten Abbildung der Mitarbeiter müssen hier, wie bei der Störungsbeseitigungszeit, die Wartezeiten, die aus der Verfügbarkeit der Mitarbeiter und deren Laufwegen entstehen, exkludiert werden, sodass nur die reine Rüstzeit aufgenommen wird. Die Bereitstellung der Rüstzeiten erfolgt je Rüstvorgang, der durch ein X in der Rüstmatrix dargestellt wird, mit einer mittleren Rüstzeit inklusive Verteilung. Falls die reine Rüstzeit aus dem MES nicht zu entnehmen ist, muss sie aus Stationsprotokollen berechnet oder mittels einer manuellen Messung erhoben werden.

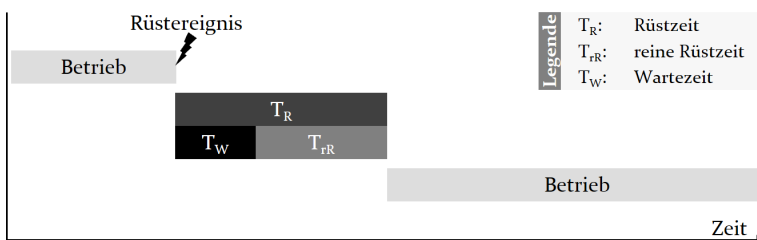


Bild 51: Zusammensetzung der Rüstzeit aus Wartezeit und reiner Rüstzeit

Die letzten Parameter der Datenklasse P stellen die Anzahl und Qualifikation der Mitarbeiter dar. Die Anzahl der Mitarbeiter wird in tabellarischer

Form aus einem Schichtbuch entnommen. Die Tabelle kann um mitarbeiterspezifische Qualifikationsprofile ergänzt werden. Diese können je nach Anwendungsfall von einer Unterscheidung zwischen logistischen und fertigungsbezogenen Aufgaben bis hin zur Unterscheidung einzelner, produktionsprozessbezogener Aufgaben reichen.

Die beschriebenen Aufbereitungsschritte der Daten der Datenklasse P können manuell oder automatisiert durchgeführt werden. Grundsätzlich ist bei mehrfacher Aktualisierung des Simulationsmodells mit neuen Daten aus dem Digitalen Schatten eine Automatisierung der Aufbereitungsschritte anzustreben, um manuelle Aufwände zu minimieren. Darüber hinaus ist die Aufbereitungsgeschwindigkeit ein limitierender Faktor für die Einsetzbarkeit des Simulationsmodells in der Anwendung des Digitalen Zwillings hinsichtlich des Timings (s. Unterkapitel 3.2.3).

5.3.4 Datenspeicherung

Die aufbereiteten Daten der Datenklasse P müssen für deren Anwendung zur Verfügung gestellt werden. Für die Kopplung von Datenquellen, -aufbereitung und -bereitstellung existieren verschiedene Ausprägungen. Bild 52 stellt vier Möglichkeiten der digitalen Kopplung zweier Anwendungen nach HOHPE ET AL. dar.

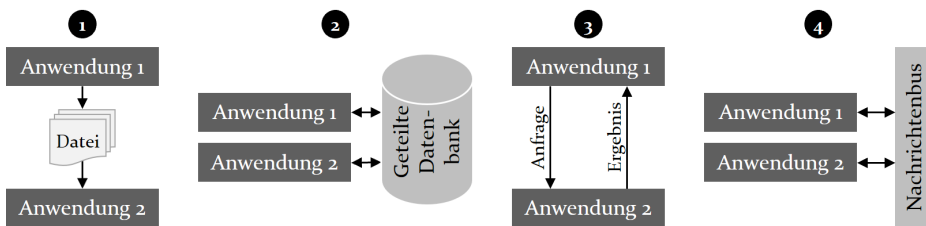


Bild 52: Vier Arten der digitalen Kopplung von Anwendungen in Anlehnung an [87]: 1. Dateitransfer, 2. geteilte Datenbank, 3. Remote Procedure Invocation, 4. Messaging

Die erste Art der Kopplung ist der Dateitransfer. Hierbei stellt eine Anwendung einer anderen Anwendung die benötigten Daten in Form einer oder mehrerer Dateien bereit. Diese Art der Implementierung ist bei sporadisch und asynchron auftretenden Übermittlungsbedarfen vertretbar. Die nächste Kopplungsart besteht aus einer Datenbank, die von den beiden Anwendungen geteilt verwendet wird. Somit können die einzelnen Anwendungen zu jeder Zeit den aktuellen Status der zu übermittelnden Daten in die Datenbank schreiben sowie aus der Datenbank abrufen und sind nicht auf die Übertragung einer neuen Datei angewiesen. Gleichzeitig besteht mit zunehmender Anzahl an zu kopplenden Anwendungen zunehmender

Aufwand für die Strukturierung der Datenbank, sodass alle Anwendungen auf die notwendigen Daten zugreifen können. Für die Kopplung zweier Anwendungen kann eine Remote Procedure Invocation implementiert werden. Hierbei stellt eine Anwendung eine direkte Anfrage an die andere und erhält anschließend das Ergebnis direkt zugesandt. Für die Implementierung der Kopplung bestehen verschiedene Standards, die der Auflistung in [87] entnommen werden kann. Die letzte Art der Kopplung ist die Verwendung eines Nachrichtenbusses. Sie ermöglicht im Vergleich zur vorherigen Implementierung eine effiziente Kopplung mehrerer Applikationen. Da diese im Kontext der vorliegenden Dissertation nicht zum Einsatz kommt, wird sie an dieser Stelle nicht weiter beschrieben. [87]

Zur Bereitstellung von simulationsrelevanten Daten haben sich geteilte Datenbank etabliert. Hierbei wird lediglich zwischen drei Varianten der Speicherung der Daten in geteilten Datenbanken unterschieden. Diese sind in Bild 53 dargestellt. Die verschiedenen Varianten unterscheiden sich in der Zuordnung der Datenaufbereitung und des Datenspeichers innerhalb oder außerhalb des Simulationsmodells.

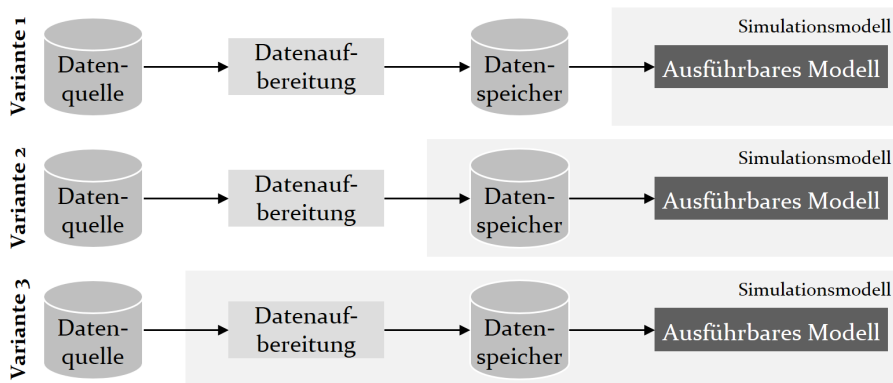


Bild 53: Möglichkeiten der Speicherung der Daten des Digitalen Schattens in Anlehnung an [88]

Variante 1 ist durch die externe Aufbereitung und Speicherung der Daten charakterisiert, wohingegen Variante 3 beide Schritte im Simulationsmodell integriert. Variante 2 ist eine Mischform, bei der die Datenaufbereitung extern, jedoch die Datenspeicherung im Simulationsmodell erfolgt. Die verschiedenen Varianten haben jeweils Vor- und Nachteile. Während bei Variante 3 keine weiteren Programme für die Datenaufbereitung und -speicherung benötigt werden, sind die für die Simulation ausgelegten Programme zumeist nicht für die Aufbereitung der Daten geeignet. Daher

empfiehlt es sich, die Datenaufbereitung in hierfür spezialisierten Programmen der Datenanalyse durchzuführen. Darüber hinaus erlaubt die Variante 1 durch die externe Speicherung der Daten deren Überprüfung auch ohne Simulationsprogramm und -expertise, die der Produktionsexperte gegebenenfalls nicht vorzuweisen hat. Daher wird die Datenaufbereitung und -speicherung gemäß der Variante 1 gewählt. Dies deckt sich mit den Ergebnissen von SKOOGH ET AL., die in ihrer Studie mit 86 Firmen ebenfalls eine externe Speicherung der Daten vor dem Import in das Simulationsmodell empfehlen. [88]

5.4 Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings im Ramp-down

Nach der Beschreibung der einzelnen Elemente des DTSM werden im Folgenden die Anwendungsfälle des Digitale Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down genauer erläutert. Hierbei stehen die Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings im Fokus. Bild 54 zeigt Einordnung der identifizierten, relevanten Anwendungsfälle (engl. Use cases, UC) aus Sicht der Produktion im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme in die Dimensionen des DTSM:

- **UC1: Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße**
Bestimmung der minimal produzierbaren Losgröße, bevor das Produktionssystem aufgrund des Einbruchs der OEE nicht mehr wirtschaftlich betrieben werden kann.
- **UC2: Optimierung der Auftragsreihenfolge**
Bestimmung der optimalen Auftragsreihenfolge, um Rüstaufwände möglichst gering und die OEE möglichst hoch zu halten.
- **UC3: Optimierung des Mitarbeiterereinsatzes**
Bestimmung des optimalen Mitarbeiterereinsatzes hinsichtlich Mitarbeiteranzahl und Aufgabenspektrum, um die OEE trotz gestiegenem Anteil manueller Aufgaben hoch zu halten.
- **UC4: Simulation von Strukturanpassungen**
Simulation von strukturellen Anpassungen des Produktionssystems im Zuge des Produktionsrückbaus, um die Rückbauplanung zu validieren.

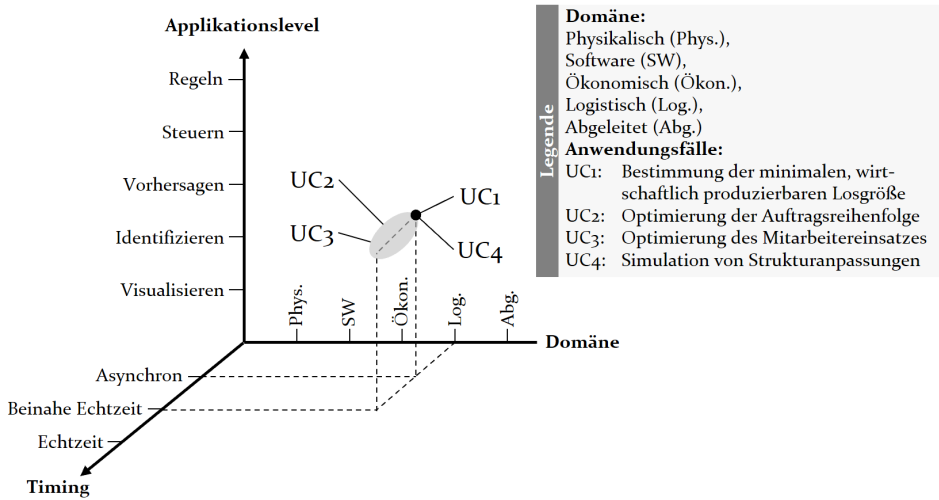


Bild 54: Einordnung der Anwendungsfälle UC₁-UC₄ Digitaler Zwillinge automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down in die Dimensionen des DTSM in Anlehnung an [P₂]

Alle Anwendungsfälle basieren auf einer Materialflusssimulation. Daher sind diese der Domäne Logistik zuzuordnen. Da es sich um planerische Anwendungsfälle handelt, sind diese grundsätzlich dem Applikationslevel Vorhersagen zuzuordnen. Während der Durchführung des Ramp-downs können UC₂ und UC₃ durch eine echtzeitnahe Datenkopplung mit dem Digitalen Schatten in das Timing „beinahe Echtzeit“ (s. Unterkapitel 3.2.3) eingeordnet werden.

In dem folgenden Unterkapitel wird die allgemeine Vorbereitung der Experimentierumgebung für die anschließenden Anwendungsfälle beschrieben. Anschließend werden die einzelnen Anwendungsfälle mit Fokus auf den Experimenten erläutert.

5.4.1 Vorbereitung der Experimentierumgebung

Zum Simulationsmodell gehören neben der grundlegenden Struktur des automatisierten Produktionssystems auch die Methoden, die bei den Experimenten zum Einsatz kommen. Diese können je nach Optimierungsproblem variieren. Die einfachste, stets einsetzbare Form stellt die Durchführung eines zuvor festgelegten Versuchsplans dar. Bei der Erstellung von Versuchsplänen kann zwischen vollfaktoriellen und teilfaktoriellen Versuchsplänen unterschieden werden.

Vollfaktorielle Versuchspläne, auch Vollfaktorpläne genannt, beinhalten alle Kombinationsmöglichkeiten der betrachteten Faktoren n_F . Die Anzahl notwendiger Versuche n_V berechnet sich in Abhängigkeit der Faktorstufenanzahl F_s wie folgt: [89]

$$n_V = F_s^{n_F} \quad (10)$$

Demzufolge ergibt sich bei einem für die Produktionssystemplanung klassischen Versuchsszenario, wie der Pufferplanung mit $n_F = 20$ Puffern je $F_s = 10$ Puffergrößen, ein Versuchsplan mit $F_s = 10^{20}$ Versuchen. Die Untersuchung aller Kombinationsmöglichkeiten führt zwar zum optimalen Ergebnis, dennoch ist dies meist nicht in angemessener Zeit durchführbar, da hierfür zu viele Rechenressourcen benötigt werden.

Um dem Abhilfe zu schaffen, können teilfaktorielle Versuchspläne, auch Teilfaktorpläne oder Screening-Pläne genannt, eingesetzt werden. Diese beinhalten nicht alle Kombinationsmöglichkeiten, sondern, je nach Vorgehen, nur eine Teilmenge [89]. Zur Erstellung dieser Versuchspläne existiert eine Vielzahl an Vorgehensweisen. Eine Übersicht dieser ist in [89] gegeben. Sie alle besitzen den Vorteil, dass weniger Versuche durchgeführt werden müssen, um vergleichsweise qualitativ hochwertige Aussagen treffen zu können. Bei diesen Vorgehensweisen kann jedoch nicht davon garantiert werden, dass das globale Optimum detektiert wird.

Unabhängig von der Wahl des Versuchsplans muss das Simulationsmodell fähig sein, Versuchspläne zu erstellen und abzuarbeiten. Bild 55 zeigt die systematische Abarbeitung von Versuchsplänen mit definierten Stellgrößen. Im ersten Schritt wird auf Basis der Stellgrößen ein Versuchsplan erstellt. In Schritt zwei werden die Parameter des ersten Versuchs in das Simulationsmodell übergeben. Bei diesen handelt es sich um die Daten der Datenklasse D. Mit Hilfe des Simulationsmodells werden im Folgenden die Versuche durchgeführt. Dabei ist zu beachten, dass Versuche bei stochastischen Systemparametern mit mehreren Beobachtungen durchgeführt werden müssen. Nach Durchführung eines Versuchs inklusive der notwendigen Beobachtungen werden in Schritt vier die Ergebnisdaten (Datenklasse E) gespeichert. So lange nicht alle Versuche des Versuchsplans durchgeführt wurden, werden die Schritte zwei bis vier durch Auswahl eines neuen Versuchs (Schritt 5) wiederholt. Abschließend erfolgt die Bewertung der Versuche anhand eines Vergleichs mit den Zielvorgaben.

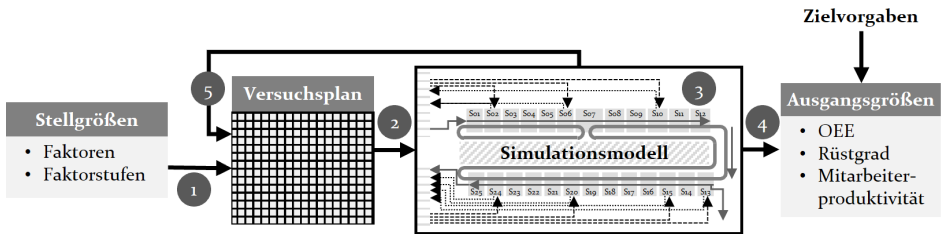


Bild 55: Systematische Abarbeitung von Versuchsplänen anhand der Schritte 1. Versuchsplanerstellung, 2. Versuchsparameterübergabe, 3. Simulation, 4. Speicherung der Ergebnisdaten und 5. Auswahl des nächsten Versuchs

Neben der Erstellung von Versuchsplänen und deren Abarbeitung können dedizierte Optimierungsmethoden mit der Simulation gekoppelt werden. Die vier Kopplungsmöglichkeiten wurden bereits in Bild 21 dargestellt. Im Kontext Simulation von Produktionssystemen kommt, wie in Unterkapitel 3.1.2 beschrieben, zumeist die Kopplungsvariante 4 zum Einsatz [58]. Der Einsatz der Optimierungsmethoden ermöglicht im Gegensatz zu den statischen Versuchsplänen eine zielgerichtete Suche nach optimalen Lösungen. Bild 56 zeigt eine Übersicht gängiger Optimierungsmethoden, die im Kontext der simulationsbasierten Optimierung von Produktionssystemen eingesetzt werden können. Hierzu zählen deterministische, evolutionäre und genetische Verfahren sowie Zufalls-, Permutations- und Schwellwertverfahren. Je nach Fragestellung können unterschiedliche Optimierungsansätze zielführend verwendet werden. Detaillierte Übersichten der Optimierungsansätze können [27] und [58] entnommen werden. [27]

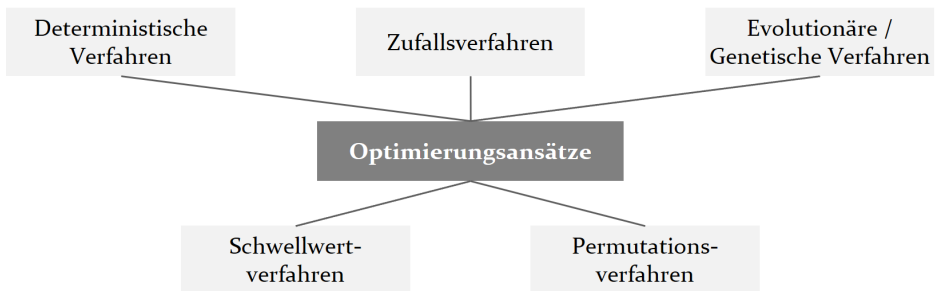


Bild 56: Übersicht gängiger Optimierungsansätze im Kontext der Simulation von Produktion und Logistik in Anlehnung an [27]

Neben der Bereitstellung der Versuchspläne oder Optimierungsalgorithmen muss das Simulationsmodell die Ergebnisse der Experimente dem Anwender adäquat zur Verfügung stellen. Grundsätzlich müssen alle Ergebnisdaten in maschinell lesbarer Form gespeichert werden. Je nach System zur Ergebnisdatenspeicherung können hierbei die Verfahren aus Bild 52

eingesetzt werden. Grundsätzlich empfiehlt sich eine Speicherung der Ergebnisdaten in einer separaten Datenbank. Darüber hinaus sollten die Ergebnisdaten in standardisierten Ergebnisberichten bereitgestellt werden. Diese ermöglichen dem Anwender eine schnelle Verifikation und Validierung der Simulationsmodelle.

5.4.2 Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße

Die sinkende Nachfrage im Ramp-down führt zu sinkenden Losgrößen bei vorerst gleichbleibender Variantenvielfalt. Dadurch werden automatisierte Produktionssysteme, die für die automatisierte Produktion großer Stückzahlen ausgelegt sind, mit steigenden manuellen Rüstaufwänden konfrontiert. In diesem Zuge muss untersucht werden, wann die manuellen, nicht wertschöpfenden Tätigkeiten die wertschöpfenden Tätigkeiten in dem Maße überschreiten, dass auf dem automatisierten Produktionssystem nicht mehr wirtschaftlich produziert werden kann. Dieser Kippunkt L_{Kipp} wird mit folgendem Vorgehen identifiziert.

Initial wird ein Versuchsplan mit konstant sinkenden Losgrößen bei gleichbleibender Auftragsreihenfolge erstellt. Die Auftragsreihenfolge beinhaltet verschiedene Produktvarianten gleicher Losgröße, die im Ramp-down produziert werden. Beginnend mit der maximalen Losgröße L_{Max} werden alle Losgrößenabstufungen mit der Schrittweite S bis zur minimalen Losgröße L_{Min} aufgelistet. Die Anzahl der Versuche ist der Formel in Bild 57 zu entnehmen. Der Versuchsplan wird dem Simulationsmodell übergeben und von jenem durchgeführt. Nach COLLISI entsprechen diese Daten der Datenklasse D [82]. Die Anzahl der durchzuführenden Simulationsläufe ergibt sich durch die Multiplikation der einzelnen Versuche mit der Anzahl der Observationen je Versuch. Diese sind notwendig, damit das stochastische Verhalten der Eingangsgrößen berücksichtigt wird.

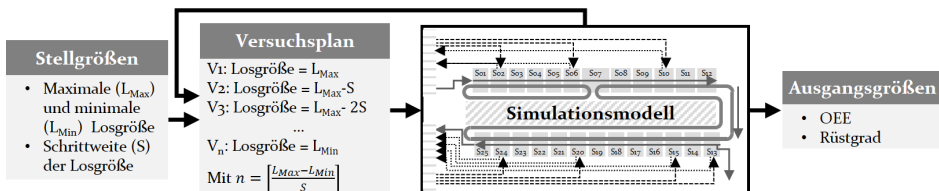


Bild 57: Übersicht der Stellgrößen, Versuchsplanung und Ausgangsgrößen zur Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße

Bild 57 zeigt die Stellgrößen, den daraus resultierenden Versuchsplan sowie die Ausgangsgrößen für die Bestimmung der minimalen Losgröße. Die Ergebnisse der Versuche werden grundsätzlich anhand der OEE gemessen. Zusätzlich kann der Rüstgrad für weitere Analysen herangezogen werden. Die Visualisierung der Versuchsergebnisse erfolgt, wie in Bild 58 dargestellt, indem die OEE über der sinkenden Losgröße aufgetragen wird. Dabei ist der Kippunkt L_{Kipp} zu identifizieren, ab dem die weiter sinkende Losgröße einen deutlichen Einbruch der OEE zur Folge hat. Ab diesem Punkt ist die Produktion kleinerer Losgrößen mit den vorgesehenen Mitarbeitern und Stationen deutlich weniger wirtschaftlich.

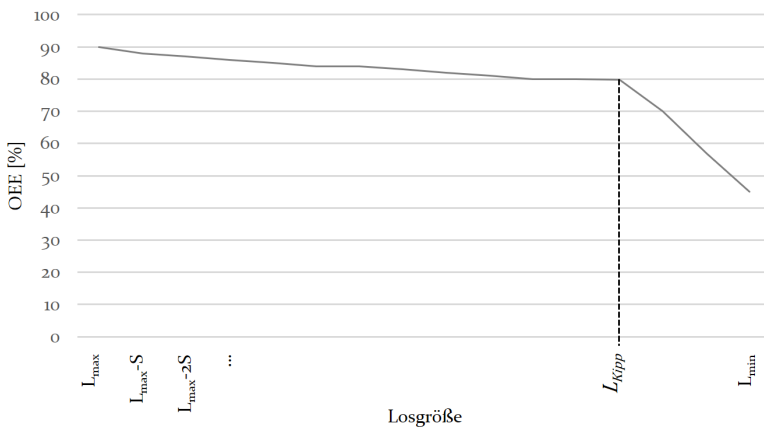


Bild 58: Identifikation des Losgrößenkipppunktes L_{Kipp} ab dem keine wirtschaftliche Produktion im bestehenden Produktionssystem mehr möglich ist

Die Bestimmung der minimalen Losgröße ist losgelöst von der laufenden Produktion durchzuführen. Es wird keine echtzeitnahe Kopplung mit dem Asset benötigt. Daher wird dieser Anwendungsfall im Timing unter asynchron eingeordnet (s. Bild 54). Die Losgrößenbetrachtung sollte bei geänderten Ausgangsbedingungen, wie Änderungen in der Struktur des Produktionssystems oder geänderter Mitarbeiterereinsatzplanung, erneut durchgeführt werden.

5.4.3 Optimierung der Auftragsreihenfolge

Der nächste Anwendungsfall ist die Optimierung der Auftragsreihenfolge. Entscheidend für den Rüstaufwand des automatisierten Produktionssystems sind die an den Stationen auszutauschenden Werkzeuge beim Wech-

sel der zu produzierenden Produktvariante. Bild 59 zeigt die für den Anwendungsfall relevanten Stellgrößen, den Versuchsplan und die Ergebnisdaten.

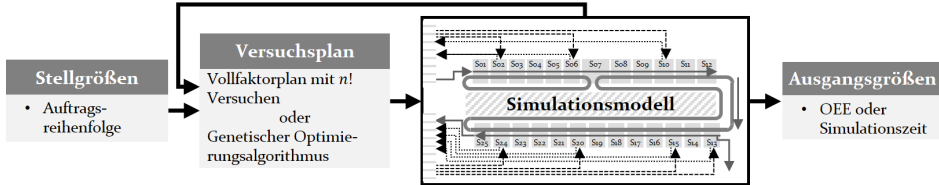


Bild 59: Übersicht der Stellgrößen, Versuchsplanung und Ausgangsgrößen zur Bestimmung der optimalen Auftragsreihenfolge

Die je Station individuellen Prozesszeiten können sich je Produktvariantenwechsel unterscheiden (s. Unterkapitel 5.3.3). Für die Wahl der optimalen Auftragsreihenfolge stehen bei n Aufträgen $n!$ potentielle Reihenfolgen zur Auswahl. Diese müssen unter Beachtung der stochastischen Parameter mit mehreren Observationen simuliert werden. So ergeben sich bei $n_A = 8$ Aufträgen mit je $n_O = 5$ Observationen gemäß

$$\text{Anzahl Simulationsläufe} = n_O \times n_A! = 5 \times 8! \quad (11)$$

bereits 201.600 individuelle Simulationsläufe, die durchzuführen sind. Bei einer fiktiven Zeit von einer Sekunde je Simulationslauf ergibt sich bereits eine reine Simulationszeit von 56h. Die Simulation aller möglichen Auftragsreihenfolgen ist daher zumeist nicht durchführbar.

Deshalb können Optimierungsmethoden, wie die genetische Optimierung (s. Bild 56), eingesetzt werden, die schneller zu einem akzeptablen Ergebnis kommen. Grundsätzlich wird hierbei die Simulation in die Optimierung, wie in Bild 21 als Möglichkeit 4 dargestellt, eingebunden. Zur Bewertung der einzelnen Versuche werden die OEE oder die Simulationszeit der einzelnen Simulationsläufe und der Rüstgrad herangezogen. Dabei wird die notwendige Simulationszeit für die Produktion der einzelnen Auftragsreihenfolgen gespeichert, wobei die Reihenfolge mit der kürzesten Simulationszeit das beste Ergebnis darstellt. Die Ergebnisse werden in einer Tabelle mit den besten Reihenfolgen inklusive ihrer resultierenden OEE oder der benötigten Simulationszeit bereitgestellt.

Die Optimierung der Auftragsreihenfolge kann hinsichtlich des Timings im DTSM in den Stufen asynchron oder beinahe Echtzeit durchgeführt werden. Während einmalige, vorausschauende Bestimmungen der Auftragsreihenfolge die Produktionsplanung verbessern, kann die kurzfristige simulative Optimierung der Auftragsreihenfolge als Reaktion auf aktuell in

der Produktion auftretende Ereignisse eingesetzt werden. Zu diesen Ereignissen zählen kurzfristige Stillstände oder Anpassungen der Kundenabrufe. Um hier belastbare Ergebnisse zu erlangen, werden aktuelle Produktionsparameter benötigt. Daher ist diese Anwendung dem Timing beinahe Echtzeit zuzuordnen.

5.4.4 Optimierung des Mitarbeiterereinsatzes

Neben der Optimierung der Auftragsreihenfolge und der Losgröße wird der Mitarbeiterereinsatz bei steigendem Anteil manueller Tätigkeiten optimiert. Grundsätzlich können die Mitarbeiteranzahl M sowie die individuelle Qualifikation der Mitarbeiter untersucht werden. Bild 60 zeigt die Übersicht der für den Anwendungsfall benötigten Stellgrößen, des Versuchsplans und der Ausgangsgrößen. Mit Hilfe der Mitarbeiteranzahl und -qualifikation können entweder ein Vollfaktorplan oder verschiedene Szenarien erstellt werden, die anschließend unter Beachtung der stochastischen Einflussgrößen simuliert werden. Hierbei werden entweder eine im Ramp-down erwartete Auftragsreihenfolge mit entsprechenden Losgrößen festgelegt oder eine aktuelle Auftragsreihenfolge herangezogen, die über die einzelnen Versuche unverändert bleiben.

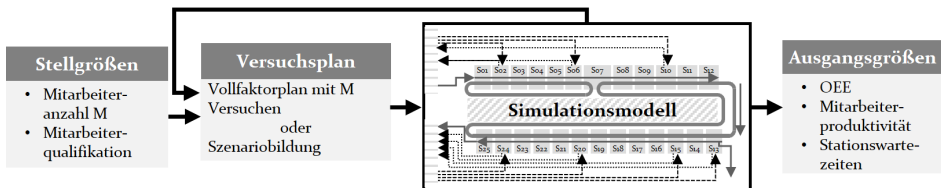


Bild 60: Übersicht der Stellgrößen, Versuchsplanung und Ausgangsgrößen zur Bestimmung des optimalen Mitarbeiterereinsatzes

Die Bewertung der Ergebnisse erfolgt anhand der OEE sowie bei Bedarf weiterer KPIs wie der Mitarbeiterproduktivität oder der Wartezeiten der Stationen. Zur Visualisierung der Ergebnisse dient ein Diagramm mit der OEE, der Mitarbeiterproduktivität und der kumulierten Stationswartezeiten über der Mitarbeiteranzahl, wie in Bild 61 dargestellt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist sowohl auf eine möglichst hohe OEE als auch auf eine nicht zu tief sinkende Mitarbeiterproduktivität zu achten. Für eine detailliertere Analyse können auf die individuellen Auslastungen der Mitarbeiter und Maschinen sowie auf die Darstellung der von den Mitarbeitern zurückgelegten Wege in Sankey-Diagrammen zurückgegriffen werden.

5 Konzipierung des Digitalen Zwillings für den Ramp-down automatisierter Produktionssysteme

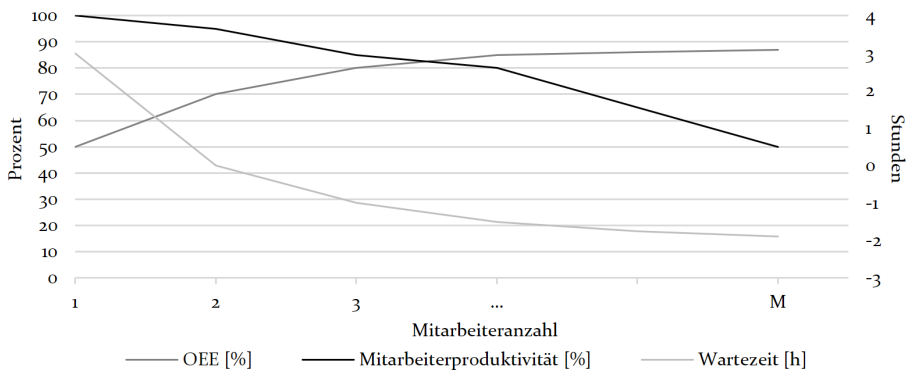


Bild 61: Darstellung der OEE, der Mitarbeiterproduktivität und der Wartezeiten der Stationen über der Mitarbeiteranzahl zur Bestimmung der optimalen Mitarbeiteranzahl

Wie die Optimierung der Auftragsreihenfolge, kann auch die Optimierung des Mitarbeitereinsatzes einmalig als Teil der Planung durchgeführt werden. Hierbei handelt es sich hinsichtlich des Timings des DTSM um eine asynchrone Anwendung. Des Weiteren kann der Mitarbeitereinsatz parallel zum laufenden Serienbetrieb bei kurzfristigen Mitarbeiterausfällen eingesetzt werden. Dies ist vor allem sinnvoll, wenn die Aufgabenverteilungen anhand der Qualifikationen der Mitarbeiter umgeplant werden können. Hierbei handelt es sich um eine Anwendung, die dem Timing beinahe Echtzeit zuzuordnen ist.

5.4.5 Simulation von Strukturanpassungen

Sobald kein wirtschaftlicher Betrieb des bestehenden, automatisierten Produktionssystems mehr möglich ist, müssen strukturelle Anpassungen durchgeführt werden. Die hierfür notwendige Rückbauplanung kann mit Hilfe des Digitalen Zwillings validiert werden. Bild 62 zeigt eine Übersicht der hierfür benötigten Stellgrößen, des daraus resultierenden Versuchsplans und der Ausgangsgrößen. Für die Beschreibung der strukturellen Veränderungen werden Daten aus den Datenklassen S, A und P benötigt. Beispiele für geänderte Strukturdaten sind neue Stationen und Puffer oder ein neues Produktionslayout. Diese implizieren eine Änderung in den Ablaufdaten und Parametern, die ebenfalls angepasst werden müssen. Die Änderungen können gemäß der Rückbauprinzipien nach AURICH ET AL. durchgeführt werden [37].

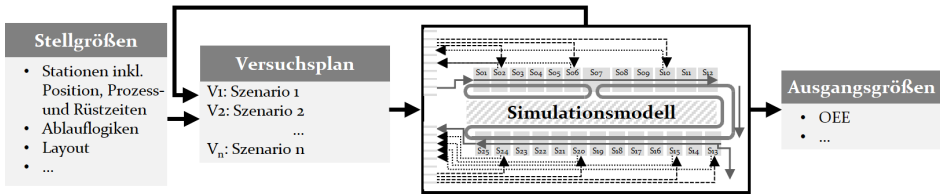


Bild 62: Übersicht der Stellgrößen, Versuchsplanung und Ausgangsgrößen zur Simulation von Strukturanpassungen in der Planung des Produktionsrückbaus

Für die Bewertung der Strukturanpassungen werden zu überprüfende Szenarien gebildet, die in einem Versuchsplan gesammelt werden. Dieser wird unter Beachtung der stochastischen Einflussgrößen simuliert. Die Ergebnisse werden anhand der OEE bewertet. Darüber hinaus können weitere spezifische KPIs, wie der Rüstgrad oder die Laufwege der Mitarbeiter in einem neuen Layout, verwendet werden. Neben der Auflistung der besten Szenarios mit ihren KPIs sollten die Simulationsmodelle der neuen Szenarien, in denen die strukturellen Anpassungen sichtbar sind, dargestellt werden. Dies erhöht das Verständnis des Anwenders bei der Interpretation der Ergebnisse. Die vielversprechendsten Szenarien der Rückbauplanung sollten anschließend anhand der Anwendungsfälle UC₁₋₃ auf ihre Tauglichkeit im Ramp-down untersucht werden. Die Simulation struktureller Anpassungen ist eine im Ramp-down anfallende Planungsaufgabe, die losgelöst von der laufenden Produktion durchgeführt werden kann. Daher handelt es sich bei dieser Anwendung um das Timing „Asynchron“ (s. Bild 54).

6 Methode DT₄RampDown für den Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme

In Kapitel 5 wird der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down aus technischer Perspektive detailliert. Das folgende Kapitel führt die Methode DT₄RampDown ein, die den Einsatz des Digitalen Zwillings in der Planung und Durchführung des Ramp-downs beschreibt. Anschließend wird die Methode in Kapitel 6.2 in die übergeordneten Ramp-down Managementansätze eingeordnet. Teile der folgenden Ausführungen sind an den vom Autor am Lehrstuhl FAPS betreuten studentischen Arbeiten [S₁, S₃, S₅, S₆] angelehnt und wurden bereits veröffentlicht [P₄].

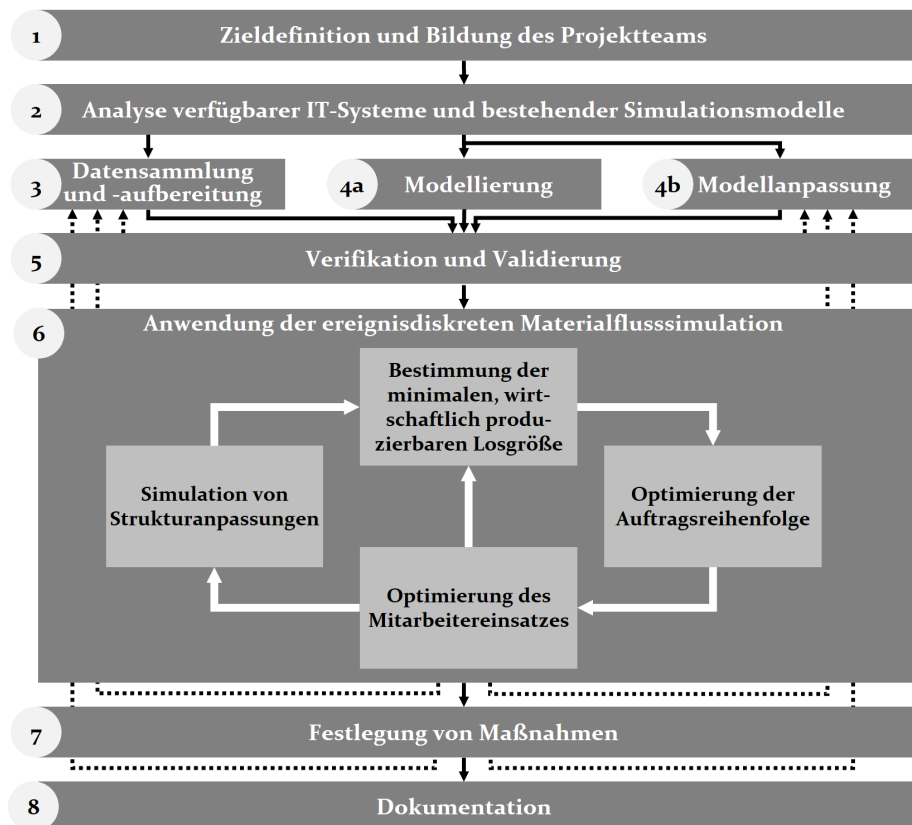


Bild 63: Achtstufige Methode DT₄RampDown für den Einsatz des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down

6.1 Detaillierung der Methode DT₄RampDown

Bild 63 zeigt die achtstufige Methode DT₄RampDown, deren Schritte in den folgenden Unterkapiteln 6.1.1 bis 6.1.8 im Detail beschrieben werden. Der grundsätzliche Aufbau der Methodenschritte (1) bis (5) orientieren sich an der in Bild 20 dargestellten allgemeinen Vorgehensweise zur Durchführung von Simulationsstudien. Die Methode DT₄RampDown wird grundsätzlich sequenziell abgearbeitet. Lediglich die Methodenschritte (3) Datensammlung und -aufbereitung sowie (4a) Modellierung und (4b) Modellanpassung laufen parallel ab. Auf die Rückkopplungen, dargestellt als gestrichelte Pfeile, von der Verifikation und Validierung, Methodenschritt (5), zu den Methodenschritten (3) und (4b), sowie von der Anwendung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation, Methodenschritt (6), und Methodenschritt (7), der Festlegung von Maßnahmen, zu den Methodenschritten (3) und (4b) wird im Unterkapiteln 6.1.5 und 6.1.6 im Detail eingegangen.

6.1.1 Zieldefinition und Bildung des Projektteams

Das Ziel des ersten Schrittes der Methode DT₄RampDown ist Zieldefinition für den Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down sowie die Bildung des hierfür benötigten Projektteams. Für die Zieldefinition wird die Ist-Situation des automatisierten Produktionssystems im Kontext des Ramp-downs spezifiziert. Hierfür werden der Wertstromverantwortliche sowie der Fertigungsplaner des zu betrachtenden, automatisierten Produktionssystems benötigt, wobei die Verantwortung für die Durchführung bei dem Wertstromverantwortlichen liegt.

Zu Beginn werden die Ursachen für den anstehenden oder bereits vorhandenen Ramp-down des automatisierten Produktionssystems identifiziert. Dies erfolgt anhand der in Bild 6 dargestellten Gründe. Diese globale Einordnung der Ist-Situation dient dem besseren Verständnis aller teilnehmenden Personen des Projektteams und zeigt gleichzeitig auf, welche Folgen der Ramp-down des automatisierten Produktionssystems haben kann, beziehungsweise zukünftig verursachen wird.

Im nächsten Schritt wird geprüft, ob sich das Produktionssystem bereits im Ramp-down befindet oder dieser sich erst anbahnt. Falls der Ramp-down aktuell geplant wird, können die in Bild 7 dargestellten Ramp-down Strategien zur weiteren Ausdetaillierung herangezogen werden. Falls sich das automatisierte Produktionssystem bereits im Ramp-down befindet, sind

die aktuellen Auswirkungen auf die Produktion, wie beispielsweise sinkende Stückzahlen, aufzunehmen. Dabei wird die Ist-Situation hinsichtlich der vergangenen, aktuellen und geplanten Ausbringung in eine der Ramp-down Strategien aus Bild 7 eingeordnet.

Anschließend wird das Projektteam gebildet, welches für die Durchführung der Methode DT₄RampDown benötigt wird. Dieses sollte gemäß der Handlungsempfehlungen von ELBERT grundsätzlich interdisziplinär aufgebaut werden [53]. Demzufolge wird mindestens je eine Person aus den folgenden Bereichen benötigt: Wertstrommanagement, Fertigungsplanung, Logistik, Fertigungsleittechnik oder Data Science und Materialflusssimulation. Abschließend wird dem gesamten Projektteam vom Wertstromverantwortlichen die Ist-Situation des automatisierten Produktionssystems im Ramp-down vorgestellt. Darüber hinaus werden die Potentiale des Einsatzes des Digitalen Zwillings im Ramp-down anhand der in Kapitel 5.4 definierten Anwendungsfälle UC₁₋₄ präsentiert:

Mit Hilfe des UC₁ wird initial für das bestehende automatisierte Produktionssystems die minimale, wirtschaftlich produzierbare Losgröße bestimmt. Hierbei wird die Losgröße L_{Kipp} identifiziert, ab dieser ohne organisatorische oder strukturelle Anpassung des automatisierten Produktionssystems keine wirtschaftliche Produktion mehr möglich ist.

Durch die Optimierungen der Auftragsreihenfolge (UC₂) werden die Rüstaufwände bestmöglich minimiert, wodurch sich die Auslastung der Mitarbeiter reduziert. Mit Hilfe der Optimierung des Mitarbeiterinsatz (UC₃) wird untersucht, inwieweit die Anpassung der Mitarbeiteranzahl, weitere Potentiale aufdecken.

Falls das automatisierte Produktionssystem auf Basis der UC₁₋₃ die geforderten Randbedingungen (Produktionsaufträge, maximale Mitarbeiteranzahl) nicht erfüllen kann, werden die Rückbauoptionen konzipiert und anhand des UC₄, Simulation von Strukturanpassungen, bewertet.

Auf Basis der Potentiale des Einsatzes des Digitalen Zwillings im Ramp-down wird ein gemeinsames Ziel definiert und vom gesamten Projektteam verabschiedet. Dieses beinhaltet die Festlegung der geplanten Untersuchungen sowie deren Zeithorizont. Bild 64 fasst die Ergebnisse des ersten Methodenschrittes sowie die hierzu benötigten Teilnehmer zusammen.

Zieldefinition und Bildung des Projektteams				
1		Ziel	Teilnehmer	Ergebnisse
2		Bildung des Projektteams und Beschreibung des Ziels des Einsatzes des Digitalen Zwillings im Ramp-down	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Wertstromverantwortlicher</u> • Fertigungsplaner • Logistiker • Fertigungsleit-techniker oder Data Scientist • Simulationsexperte 	<ul style="list-style-type: none"> • Spezifikation des Ist-Zustands • Zusammensetzung des Projektteams • Gemeinsame Zieldefinition • Zeitlicher Rahmen für den Einsatz
3	4a 4b			
5				
6				
7				
8				

Bild 64: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Zieldefinition und Bildung des Projektteams

6.1.2 Analyse verfügbarer IT-Systeme und bestehender Simulationsmodelle

Im zweiten Schritt der Methode DT₄RampDown wird das automatisierte Produktionssystem hinsichtlich der verfügbaren IT-Systeme zur anschließenden Datensammlung und Modellierung oder Modellanpassung sowie hinsichtlich eventuell bereits bestehender Simulationsmodelle detaillierter betrachtet.

Initial ist festzustellen, ob bereits ein Materialflusssimulationsmodell des betrachteten automatisierten Produktionssystems vorliegt, das im Folgenden, wie in Unterkapitel 3.1.2 beschrieben, nachgenutzt werden kann. Um festzustellen, ob eine Nachnutzung sinnvoll ist, müssen deren Machbarkeit und Zweckmäßigkeit untersucht werden. Hierfür kann die von WENZEL ET AL. beschriebenen Kriterien und Vorgehensweise zurückgegriffen werden. [59] Aus dieser Betrachtung folgt, ob ein neues Simulationsmodell erstellt oder ein bestehendes an die Spezifika des Ramp-downs angepasst werden muss.

Sowohl für die Neuerstellung als auch für die Anpassung eines Modells müssen die verfügbaren Datenquellen gemäß den Ausführungen in den Unterkapiteln 5.2.1 und 5.2.2 identifiziert und festgelegt werden. Gleiches gilt für die Parameter, die dem Digitalen Schatten zuzuordnen sind. Hierbei werden die in Unterkapitel 5.3.2 beschriebenen Datenquellen im vorliegenden Untersuchungsobjekt identifiziert und festgelegt, welche Datenquelle welche Parameter bereitstellen kann. Falls benötigte Daten nicht in einer der identifizierten Datenquellen vorliegen, so wird festgelegt, dass diese im Zuge der Datensammlung und -aufbereitung mittels vor Ort Begehungen des automatisierten Produktionssystems manuell aufgenommen werden müssen.

Da die Fertigungsplanung tagtäglich am Asset arbeitet, ist der Fertigungsplaner im Projektteam für die Durchführung dieses Methodenschrittes verantwortlich. Darüber hinaus werden die Teammitglieder aus der Fertigungsleittechnik oder Data Science, der Logistik für die Identifikation und Festlegung der IT-Systeme sowie der Simulationsexperte für die Analyse der bestehenden Simulationsmodelle hinzugezogen.

Bild 65 fasst das Ziel des zweiten Methodenschrittes, dessen Ergebnisse sowie die hierfür benötigten Teilnehmer zusammen.

Analyse verfügbarer IT-Systeme und bestehender Simulationsmodelle			
1			
2			
3	4a	4b	
5			
6			
7			
8			
	Ziel Festlegung existierender IT-Systeme für die Datensammlung als Grundlage für das Simulationsmodell	Teilnehmer <ul style="list-style-type: none"> • <u>Fertigungsplaner</u> • <u>Logistiker</u> • <u>Fertigungsleittechniker oder Data Scientist</u> • <u>Simulationsexperte</u> 	Ergebnisse <ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung über Modellierung • Datenquellen für Modellierung oder Modellanpassung • Datenquellen für Digitalen Schatten

Bild 65: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Analyse verfügbarer IT-Systeme und bestehender Simulationsmodelle

6.1.3 Datensammlung und -aufbereitung

Der dritte Schritt der Methode DT4RampDown, die Datensammlung und -aufbereitung, verläuft wie in der allgemeinen Vorgehensweise zur Durchführung von Simulationsstudien (s. Bild 20) parallel zur Modellierung und Modellanpassung. Das Ziel der Datensammlung und -aufbereitung ist die Bereitstellung aller Daten des Digitalen Schattens und, falls notwendig, der Daten für die Modellierung des Simulationsmodells in aufbereiteter Form.

Datensammlung und -aufbereitung			
1			
2			
3	4a	4b	
5			
6			
7			
8			
	Ziel Bereitstellung aller für die Anwendung notwendiger Daten in aufbereiteter Form	Teilnehmer <ul style="list-style-type: none"> • <u>Fertigungsplaner</u> • <u>Logistiker</u> • <u>Fertigungsleittechniker oder Data Scientist</u> • <u>Simulationsexperte</u> 	Ergebnisse <ul style="list-style-type: none"> • Zeitraum für Datengrundlage • Parameter des Digitalen Schattens • Falls notwendig: Struktur- und Ablaufdaten für das Simulationsmodell

Bild 66: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Datensammlung und -aufbereitung

Die beteiligten Personen des Projektteams in diesem Methodenschritt können Bild 66 entnommen werden. Die Verantwortung für die Datensammlung und -aufbereitung liegt bei dem Vertreter der Fertigungsleittechnik oder der Data Science. Die Ergebnisse dieses Methodenschrittes sind ein definierter Zeitraum für die Datensammlung und -auswertung sowie die aufbereiteten Daten.

Gemäß den Anforderungen des Simulationsexperten werden die für die anschließende Modellierung oder Modellanpassung benötigten Struktur- und Ablaufdaten den im Methodenschritt zuvor definierten Quellen entnommen und bereitgestellt. Falls benötigte Daten nicht digital vorliegen, so werden diese durch eine Begehung des automatisierten Produktionssystems manuell erfasst.

Zur Sammlung der Parameter des Digitalen Schattens wird das in Bild 67 dargestellte vierstufige Vorgehen angewandt. Dessen einzelne Schritte werden im Folgenden genauer erläutert.

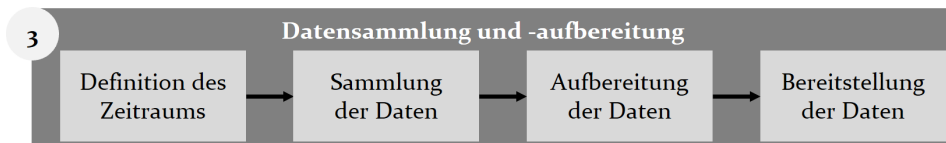


Bild 67: Vierstufiges Vorgehen zur Datensammlung und -aufbereitung

Als erstes wird der Betrachtungszeitraum festgelegt, aus dem die Daten erhoben werden sollen. Hierbei ist darauf zu achten, dass im Betrachtungszeitraum keine, vom Produktionsalltag abweichende Ereignisse vorhanden sind, wie beispielsweise längere Wartungsschichten oder Stillstandzeiten aufgrund von Großstörungen. Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass in dem definierten Zeitraum alle für den Ramp-down relevanten Produktvarianten gefertigt wurden, sodass deren variantenabhängige Prozess- und Rüstzeiten aufgenommen werden können. Falls sich das Produktionssystem noch nicht im Ramp-down befindet, können zusätzlich spezifische Produktionstage, an denen nur geringe Losgrößen gefertigt wurden, in die Datensammlung mit aufgenommen werden.

Als nächstes werden die notwendigen Daten für den definierten Zeitraum aus den in Methodenschritt (2) definierten Datenquellen gesammelt. Anschließend müssen die Daten aufbereitet werden. Für die Aufbereitung der Daten des Digitalen Schattens werden die Vorgehensweise und Berechnungen aus Unterkapitel 5.3.3 angewandt. Hierbei ist die produktvariantenspezifische Aufbereitung der Rüstzeiten mit Hilfe von Rüstmatrizen von

besonderer Bedeutung. Die Bereitstellung der Daten erfolgt in einer separaten Datenbank (s. Bild 53). Falls einzelne, für den Anwendungsfall notwendige Daten fehlen, so werden diese manuell erhoben oder es werden in Absprache mit dem Projektteam Annahmen getroffen und bewertet.

6.1.4 Modellierung und Modellanpassung

In Methodenschritt (2) wird die Entscheidung getroffen, ob ein neues Modell erstellt werden muss oder ein bestehendes Modell angepasst werden kann. Das Ergebnis der Modellierung oder Modellanpassung ist stets ein lauffähiges Simulationsmodell für die anschließende Verifikation und Validierung. Durchgeführt werden die Modellierung oder Modellanpassung durch den Simulationsexperten. Für Rückfragen zu den bereitgestellten Daten oder zur Modellformalisierung stehen die Vertreter der Fertigungsleittechnik beziehungsweise Data Science sowie der Fertigungsplanung und Logistik zur Verfügung. Im Falle einer reinen Modellanpassung kann, falls möglich, das Hinzuziehen des Autors des vorhandenen Simulationsmodells von Vorteil sein.

Bei der Modellierung und Modellanpassung ist das in Unterkapitel 5.2.3 eingeführte Metamodell anzuwenden. Die hierfür notwendigen Daten können dem parallel ablaufenden Methodenschritt der Datensammlung und -aufbereitung entnommen werden. Im Vergleich zur Modellierung eines automatisierten Produktionssystems für den Serienbetrieb muss besonderer Fokus auf der genauen Abbildung der Rüstvorgänge sowie deren produktvariantenspezifischen Parametrisierung geachtet werden. Erst diese stellen sicher, dass durch die spätere Anwendung im Ramp-down aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden. Zusammenfassend sind das Ziel der Modellierung und Modellanpassung sowie die benötigten Teilnehmer und die Ergebnisse in Bild 68 dargestellt.

a) Modellierung / b) Modellanpassung			
1	Ziel Bereitstellung des Simulationsmodells für die Verifikation und Validierung	Teilnehmer <ul style="list-style-type: none"> • Fertigungsplaner • Logistiker • Fertigungsleittechniker oder Data Scientist • <u>Simulationsexperte</u> 	Ergebnisse <ul style="list-style-type: none"> • (Angepasstes) Simulationsmodell
2			
3			
4a			
4b			
5			
6			
7			
8			

Bild 68: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Modellierung und Modellanpassung

6.1.5 Verifikation und Validierung

Nach der Modellierung oder Modellanpassung liegt ein lauffähiges Simulationsmodell vor. Dieses wird anschließend genutzt, um auf Basis der Ergebnisse Handlungsempfehlungen und Entscheidungen für den Ramp-down des Assets treffen zu können. Hierfür sind eine vorherige Verifikation und Validierung, Inhalte des Methodenschrittes (5), unerlässlich.

Für die Durchführung der Verifikation und Validierung stehen eine Reihe von verschiedenen Techniken zur Verfügung. Diese reichen von einer initialen Animation in der Simulation bis zu statistischen Verfahren. Eine Übersicht der anwendbaren Verifikations- und Validierungstechniken kann [60] entnommen werden. Für die Verifikation und Validierung des Simulationsmodells für die spätere Nutzung im Ramp-down muss vor allem auf die Rüstprozesse geachtet werden. Falls das Asset im bisherigen Betrieb bereits Produktionstage mit geringen Losgrößen durchlaufen hat, sollten diese Tage in die Verifikation und Validierung eingebunden werden, da sie dem späteren Szenario im Ramp-down am ähnlichsten sind.

Sollten bei der Verifikation und Validierung Fehler im Modell oder der verwendeten Datengrundlage ersichtlich werden, so kann zu den Methodenschritten (3), Datensammlung und -aufbereitung, und (4b), Modellanpassung, zurückgesprungen, um die Fehler zu beheben. Anschließend müssen eine erneute Verifikation und Validierung vorgenommen werden. Durchgeführt wird dieser Methodenschritt vom Simulationsexperten sowie dem Fertigungsplaner, wobei die Verantwortung für das Ergebnis bei ersterem liegt. Bild 69 fasst das Ziel, die Teilnehmer und die Ergebnisse dieses Methodenschrittes zusammen.

Verifikation und Validierung			
	<p>Ziel Lauffähiges, verifiziertes und validiertes Simulationsmodell für die Anwendung</p>	<p>Teilnehmer</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fertigungsplaner • <u>Simulationsexperte</u> 	<p>Ergebnisse</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verifiziertes und validiertes Simulationsmodell

Bild 69: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Verifikation und Validierung

6.1.6 Anwendung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation

Die Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down auf Basis der ereignisdiskreten Materialflusssimulation werden gemäß der in Bild 70 dargestellten Reihenfolge durchgeführt.

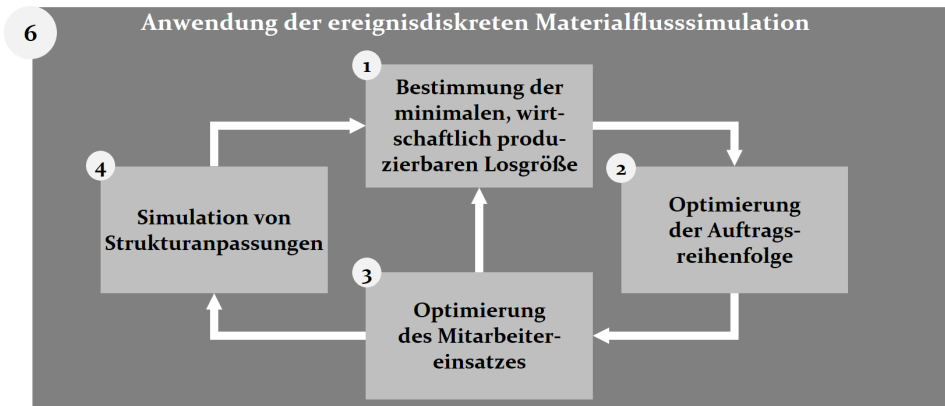


Bild 70: Reihenfolge der Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme auf Basis der ereignisdiskreten Materialflusssimulation

Zuerst wird die minimale, wirtschaftlich produzierbare Losgröße mit Hilfe des in Unterkapitel 5.4.2 beschriebenen Vorgehens bestimmt. Durch den Vergleich dieser mit den im Ramp-down bereits vorhandenen oder erwarteten zu produzierenden Losgrößen kann festgelegt werden, bis wann ohne organisatorische sowie strukturelle Anpassungen am Asset weiter wirtschaftlich produziert werden kann.

Um den Produktionsbetrieb weiter zu verbessern, wird anschließend die zu produzierende Auftragsreihenfolge optimiert. Hierbei kommt das in Unterkapitel 5.4.3 beschriebene Verfahren zum Einsatz. Dieses beinhaltet die Optimierung der Auftragsreihenfolge dahingehend, dass die produktvariantenabhängigen Rüstzeiten minimiert und der OEE des gesamten Produktionssystems maximiert werden. Diese Optimierung stellt die einfachste Möglichkeit dar, wie der Produktionsbetrieb ohne strukturelle oder größere organisatorische Anpassungen verbessert werden kann.

Eine weitere Optimierung kann, wie in UC3 in Unterkapitel 5.4.4 dargelegt, mittels organisatorischer Anpassungen des Produktionsbetriebs in Form des Mitarbeiter-einsatzes erfolgen. Ergebnis der Optimierung ist die optimale Anzahl an Mitarbeitern inklusive deren Aufgabenverteilung. Falls die

Untersuchung eine Veränderung des Mitarbeiterereinsatzes ergibt, so müssen die Methodenschritte (1) und (2) wiederholt werden, da der Mitarbeiterereinsatz in diesen Untersuchungen als feste Größen angenommen werden und deren Ergebnisse durch einen angepassten Mitarbeiterereinsatz beeinflusst werden.

Falls die Untersuchung des Mitarbeiterereinsatzes ergibt, dass reine organisatorische Anpassungen einen wirtschaftlichen Weiterbetrieb des automatisierten Produktionssystems nicht mehr erlauben, so müssen Rückbaumaßnahmen geplant werden. Diese können anhand der in Unterkapitel 2.2.3 beschriebenen Rückbauprinzipien konzipiert und anschließend mit Hilfe der Materialflusssimulation bewertet werden. Hierbei ist, wie in Unterkapitel 5.4.5 dargelegt, vorzugehen. Nach der Identifikation einer geeigneten strukturellen Anpassung sind die Schritte der UC₁₋₃ wiederholt durchzuführen.

Falls während der Durchführung der Simulationen größere Anpassungen am Simulationsmodell oder der Datengrundlage notwendig sind, dann kann zu den Methodenschritten (3) Datensammlung und -aufbereitung sowie (4b) Modellanpassung zurückgesprungen werden.

Das Vorgehen kann jederzeit beim Erreichen des definierten Zielzustandes oder einer zuvor definierten Randbedingung, wie der maximal verfügbaren Mitarbeiteranzahl, unterbrochen und mit der Aufbereitung der Ergebnisse und Ausarbeitung der Handlungsempfehlungen fortgesetzt werden. Verantwortlich für die Durchführung der Simulationen sowie für die Aufbereitung der Ergebnisse inklusive der Handlungsempfehlungen ist der Simulationsexperte.

Falls bei der Zieldefinition die mehrfache Verwendung des Modells für eine der Untersuchungen festgelegt wurde, wird für die spätere Anwendung durch die Fertigungsplanung eine grafische Benutzeroberfläche im Simulationsmodell implementiert. Diese stellt sicher, dass die Eingabe der sich ändernden Parameter in der wiederholten Nutzung des Modells ohne fundierte Simulationskenntnisse und Aufwand erfolgen kann. Gleichzeitig wird eine anwenderfreundliche, automatisierte Aufbereitung der Ergebnisdaten bereitgestellt. Erst dies ermöglicht eine weitere Nutzung des Simulationsmodells durch Teilnehmer des Projektteams ohne Simulationsexpertise.

Die Eckdaten der Anwendung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation sind in Bild 71 zusammengefasst.

Anwendung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation			
	Ziel	Teilnehmer	Ergebnisse
	Bereitstellung der Ergebnisse und Handlungsempfehlungen für die Diskussion im Projektteam	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Simulationsexperte</u> 	<ul style="list-style-type: none"> • Aufbereitete Ergebnisse der Simulationen • Handlungsempfehlungen • Falls notwendig: Benutzeroberfläche für Anwender

Bild 71: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Anwendung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme

6.1.7 Festlegung von Maßnahmen

Schritt (7) der Methode DT4RampDown, die Festlegung von Maßnahmen, ist der wichtigste Methodenschritt. In diesem werden die vom Simulationsexperten bereitgestellten Ergebnisse und ausgearbeiteten Handlungsempfehlungen im gesamten Projektteam diskutiert, um Maßnahmen für die Planung oder Durchführung des Ramp-downs des automatisierten Produktionssystems festzulegen. Hierbei ist es von besonderer Bedeutung, dass das gesamte Team in den Prozess involviert ist, da das Domänenwissen der Fertigungsplanung und Logistik bei der Interpretation der Ergebnisse benötigt wird. Dennoch liegt die Verantwortlichkeit für die Entscheidungen bei dem Wertstromverantwortlichen, da dieser die anschließende Umsetzung der festgelegten Maßnahmen am Produktionssystem verantwortet. Eine Übersicht über die Ziele, Teilnehmer und Ergebnisse dieses Methodenschritts ist in Bild 72 gegeben.

Festlegung von Maßnahmen			
	Ziel	Teilnehmer	Ergebnisse
	Festlegung von Maßnahmen für die Planung und Durchführung des Ramp-Downs des Assets	<ul style="list-style-type: none"> • <u>Wertstromverantwortlicher</u> • Fertigungsplaner • Logistiker • Fertigungsleitertechniker oder Data Scientist • Simulationsexperte 	<ul style="list-style-type: none"> • Maßnahmen für Umsetzung am automatisierten Produktionssystem

Bild 72: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Festlegung von Maßnahmen

Sollte sich bei der Diskussion der Ergebnisse im Projektteam herausstellen, dass diese aufgrund fehlerhafter Annahmen oder Daten nicht zufriedenstellend sind, dann können die Untersuchungen vom Simulationsexperten wiederholt werden. Dies ist durch die Rückkopplung von Methodenschritt (7) zu den Methodenschritten (3) Datensammlung und -aufbereitung und Methodenschritt (4b) Modellanpassung in Bild 63 dargestellt. Dabei ist darauf zu achten, dass eine weitere Verifikation und Validierung des Modells, Methodenschritt (5), zwingend notwendig sind.

Sollte das Modell für eine wiederholte Verwendung durch einen Fertigungsplaner vom Simulationsexperten vorbereitet worden sein (s. Methodenschritt (6)), können diese Iterationen mit Hilfe der Benutzeroberfläche auch ohne das Zutun des Simulationsexperten durchgeführt werden. Der Simulationsexperte muss demnach nur noch bei spezifischen Fragestellungen zur Verfügung stehen.

6.1.8 Dokumentation

Ziel der Dokumentation ist die Archivierung der entwickelten Handlungsempfehlungen und festgelegten Maßnahmen sowie der zugrundeliegenden Annahmen, Daten und Simulationsmodelle. Neben den schriftlich festgehaltenen Entscheidungen müssen die Daten aus der Datensammlung und -aufbereitung mit einer eindeutigen Zuordnung zum verwendeten Simulationsmodell abgelegt werden. Das mit Hilfe des Metamodells aufgebaute Simulationsmodell kann grundsätzlich wieder- oder weiterverwendet werden. Bei der Dokumentation des Simulationsmodells ist dennoch auf eine ausführliche Auskommentierung des Programmcodes zu achten, damit dieses ohne Probleme verstanden und erneut verwendet werden kann.

Bei der Dokumentation sind grundsätzlich alle Mitglieder des Projektteams gefordert, die Unterlagen und Notizen, die im Zuge der Erstellung und Anwendung des Simulationsmodells angefallen sind, zu archivieren. Hierfür stellt der Wertstromverantwortliche eine passende Archivierungsplattform bereit. Der Wertstromverantwortliche ist verantwortlich für die Dokumentation und beendet nach deren erfolgreichen Durchführung das Projekt. Die Projektergebnisse liegen abschließend auch weiteren Domänen des Unternehmens, wie dem Controlling, Einkauf und Vertrieb, zur Verfügung. Bild 73 fasst das Ziel und die Ergebnisse der Dokumentation sowie die Teilnehmer zusammen.

Dokumentation				
1		Ziel	Ergebnisse	
2		Bereitstellung des Simulationsmodells und der Ergebnisse zur Nachverfolgung und Nachnutzung	<ul style="list-style-type: none"> • Archiviertes Simulationsmodell • Datensätze der Experimente • Dokumentation der Handlungsempfehlungen und Maßnahmen 	
3	4a 4b			
5				
6				
7				
8				
				Teilnehmer
				<ul style="list-style-type: none"> • <u>Wertstromverantwortlicher</u> • Fertigungsplaner • Logistiker • Fertigungsleit-techniker oder Data Scientist • Simulationsexperte

Bild 73: Ziel, Teilnehmer (verantwortlich) sowie Ergebnisse der Dokumentation

6.2 Einordnung der Methode DT₄RampDown in das übergeordnete Ramp-down Management

Die entwickelte Methode DT₄RampDown beschreibt, wie mit Hilfe eines Digitalen Zwillinges auf Basis der ereignisdiskreten Materialflusssimulation Ramp-down Szenarien automatisierter Produktionssysteme hinsichtlich produktionsbezogener Einflüsse bewertet werden können. Alle hierfür notwendigen Schritte werden in der achtstufigen Methode zusammengefasst und auf Basis der in Kapitel 5 eingeführten Strukturierung des Digitalen Zwillinges genauer beschrieben. Des Weiteren wird die organisatorische Aufstellung zur Durchführung der Methode für jeden Schritt festgelegt. Wie in Forschungsfrage F₄ beschrieben, soll untersucht werden, welchen Einfluss der Einsatz des Digitalen Zwillinges im Ramp-down automatisierter Produktionssystem durch die Methode DT₄RampDown auf die existierenden, betriebswirtschaftlichen Ansätze hat.

In Kapitel 2.3 sind existierende Ansätze des Ramp-down Managements aufgezeigt, die mit Hilfe einer weiteren Ausdetaillierung des Produktionssystems hinsichtlich der produktionsbezogenen Auswirkungen ergänzt werden können. So beschreiben AURICH ET AL. verschiedene Rückbauprinzipien, die im Zuge des Ramp-downs eines automatisierten Produktionssystems realisiert werden können [37]. Die vorliegende Methode DT₄RampDown erlaubt mit dem Anwendungsfall UC₄ des Digitalen Zwillinges im Ramp-down (s. Unterkapitel 5.4.5) eine detaillierte Bewertung der verschiedenen Szenarien, indem diese mit Hilfe einer Materialflusssimulation validiert werden. Sie stellt somit eine Erweiterung des von AURICH ET AL. vorgestellten Rückbauprozesses dar [37].

WAGNER stellt in ihrer Dissertation eine Adaption der PPS für den Ramp-down vor (s. Bild 15) [6]. Auch hier stellt der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down eine wertvolle Erweiterung dar. So unterstützt der Digitale Zwilling eine Vielzahl der beschriebenen Planungstätigkeiten. Allen voran werden die Auslauffeinplanung durch die Anwendungsfälle UC₁ und UC₂ (s. Unterkapitel 5.4.2 und 5.4.3), die Planung des Personalbestands durch Anwendungsfall UC₃ (s. Unterkapitel 5.4.4) sowie die Planung von Zukunftsszenarien durch alle beschriebenen Anwendungsfälle UC₁₋₄ des Digitalen Zwillings im Ramp-down ergänzt.

Wie bereits in Kapitel 2.3 festgestellt, nutzen die meisten bestehenden Ansätze des Ramp-down Managements analytische Berechnungen und Modelle. Der in dieser Dissertation vorgestellte Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme kann die bestehenden, zumeist generischen Checklisten und analytischen Berechnungen ergänzen, wodurch mit Hilfe der eingesetzten systemspezifischen Simulationsmodelle eine höhere Qualität der Vorgehensweisen erzielt werden kann. Dennoch ist auch ein rein produktionsbezogener Einsatz der vorgestellten Methode zur Nutzung des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme möglich. Für den Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down bedarf es aus Sicht der Produktion keiner übergeordneten, betriebswirtschaftlichen Vorgehensweisen, wenngleich sich die Methode *DT₄RampDown*, wie zuvor beschrieben, nahtlos in die bestehenden, betriebswirtschaftlichen Ansätze des Ramp-down Managements eingliedern lässt.

7 Beispielhafte Implementierung und Validierung des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down

Das vorliegende Kapitel dient der Validierung des zuvor vorgestellten Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme sowie der dazugehörigen Methode DT4RampDown. Diese wird in Kapitel 7.1 anhand eines industriellen Untersuchungsobjekts durchgeführt. Das Kapitel endet mit einer Beurteilung der Anwendung anhand der in Kapitel 4.3 aufgestellten Forschungsfragen. Teile der folgenden Ausführungen zur Implementierung des Digitalen Zwillings im Ramp-down sind an den vom Autor am Lehrstuhl FAPS betreuten studentischen Arbeiten [S₁, S₃] angelehnt und wurden vom Autor bereits der Fachwelt zugänglich gemacht [P₄].

7.1 Ramp-down Planung für den auslaufenden Serienbetrieb eines automatisierten, variantenreichen Produktionssystems

Für die beispielhafte Implementierung des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down wird ein Untersuchungsobjekt aus der Automobilzuliefererindustrie herangezogen. Dabei handelt es sich um ein automatisiertes, variantenreiches Produktionssystem mit 44 Stationen sowie zum Zeitpunkt der Untersuchung drei Mitarbeitern und 81 Produktvarianten. Aufgrund der hohen Anzahl an bestehenden Produktvarianten weist das Untersuchungsobjekt eine hohe Notwendigkeit für produktionsbezogene Betrachtung des Ramp-downs mittels eines Digitalen Zwillings auf. Das Untersuchungsobjekt ist in Bild 74 dargestellt.

Im Folgenden wird die Anwendung der in Kapitel 6 eingeführten Methode DT4RampDown anhand des Untersuchungsobjekts vorgestellt. Die Ergebnisse wurden vom Autor in einem Industrieprojekt erarbeitet. Daher sind im Folgenden aus Geheimhaltungsgründen sämtliche Werte verfremdet oder rein qualitativ dargestellt. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Aussagekraft der Validierung des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down sowie der hierfür angewandten Methode DT4RampDown.



Bild 74: Bild des Untersuchungsobjekts

7.1.1 Zieldefinition und Bildung des Projektteams

Die Methode startet mit der Analyse der Ist-Situation des automatisierten Produktionssystems im Ramp-down. Das Produkt, das in dem Untersuchungsobjekt produziert wird, befindet sich aufgrund einer anstehenden Produkteliminierung im Ramp-down. Die Gründe hierfür sind die technologische Entwicklung, die Marktentwicklung sowie die Änderung der gesetzlichen Rahmenbedingungen (s. Bild 6).

Das Untersuchungsobjekt ist Teil eines internationalen Produktionsnetzwerks, dessen Produktion stufenweise heruntergefahren wird. Bild 75 zeigt die angewandte, stufenweise Ramp-down Strategie des internationalen Produktionsnetzwerks. Zum Zeitpunkt der Untersuchung bestehen jedoch noch weitere automatisierte Produktionssysteme, die das gleiche Produkt herstellen. Das Untersuchungsobjekt soll im Ramp-down das letzte automatisierte Produktionssystem sein, das vor kompletter Beendigung der weltweiten Produktion die letzten Produkte ausbringt (s. Bild 75).

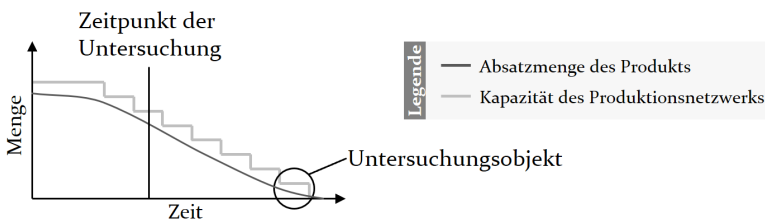


Bild 75: Verortung des Untersuchungsobjekts in der stufenweisen Ramp-down Strategie in Anlehnung an [44]

Durch die Konsolidierung aller noch zu produzierenden Produktvarianten des Produktionsnetzwerks im Untersuchungsobjekt sind die Aufrechterhaltung der Produktivität sowie eine effiziente Anpassung der Produktion von zentraler Bedeutung dar. Daher werden die folgenden Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings im Ramp-down festgelegt:

Die Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße (UC₁) wird als initial einmalige Anwendung geplant. Sie dient dazu, festzustellen, ab welcher Losgröße das Untersuchungsobjekt mit den aktuellen Produktionsparametern nicht mehr wirtschaftlich produzieren kann.

Die Optimierung der Auftragsreihenfolge (UC₂) soll einmalig durch den Simulationsexperten erfolgen, jedoch im weiteren Verlauf betriebsbegleitend durch einen Fertigungsplaner durchgeführt werden können. Demzufolge sind eine tägliche Aktualisierung der Produktionsparameter sowie eine grafische Benutzeroberfläche für die einfache Anwendung notwendig.

Die Optimierung des Mitarbeiterereinsatzes (UC₃) soll im Zuge der strategischen Planung des Ramp-downs des Untersuchungsobjekts einmalig vom Simulationsexperten durchgeführt werden. Eine betriebsbegleitende Anwendung durch den Fertigungsplaner ist nicht geplant, da die aus der Untersuchung resultierenden organisatorischen Anpassungen nicht so schnell wie die Änderung der Auftragsreihenfolge durchgeführt werden können.

Eine Revitalisierung des Untersuchungsobjekts im Zuge eines Rückbaus inklusive der damit verbundenen strukturellen Anpassungen gemäß Anwendungsfall UC₄ sind nicht vorgesehen.

Die Bearbeitung der Anwendungsfälle erfolgt im Rahmen des industriellen Kooperationsprojekts. Demnach ist ein zeitlicher Rahmen für die Durchführung der Methode DT₄RampDown von circa sechs Monaten gesetzt. Hierfür wird folgendes Projektteam zusammengestellt: Es besteht aus Vertretern des Wertstrommanagements und der Fertigungsplanung sowie seitens der Materialflusssimulation aus dem Autor und den von ihm betreuten Studierenden. Bei Bedarf kann auf Ansprechpartner der Data Science sowie der Logistik zurückgegriffen werden.

7.1.2 Analyse verfügbarer IT-Systeme und bestehender Simulationsmodelle

Ziel dieses Methodenschrittes ist die Identifikation verfügbarer IT-Systeme für die anschließende Datensammlung und Modellierung. Für das Unter-

suchungsobjekt besteht zum Zeitpunkt der Implementierung kein Simulationsmodell. Daher muss in Methodenschritt (4a) ein neues Simulationsmodell erstellt werden. Die hierfür notwendigen Daten können verschiedenen Datenquellen entnommen werden. Für das Untersuchungsobjekt werden die in Bild 76 oben dargestellten Datenquellen identifiziert. Hierzu zählen ein MES, SPS-Programme einzelner Stationen, Datenbanken des Sondermaschinenbaus sowie manuelle Beobachtungen. In Methodenschritt (3), der Datensammlung und -aufbereitung, wird genauer erläutert, welche Daten aus den identifizierten Datenquellen verwendet werden.

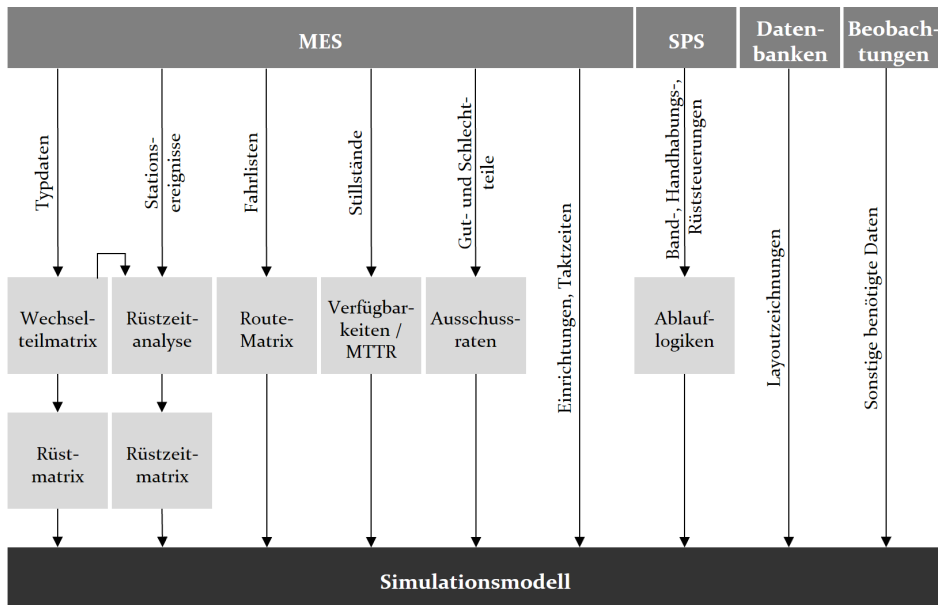


Bild 76: Übersicht der Datenquellen sowie daraus entnommener und aufbereiteter Daten des Untersuchungsobjekts

7.1.3 Datensammlung und -aufbereitung

Für die Datensammlung und -aufbereitung wird das in Bild 67 dargestellte Vorgehen angewandt. Der Zeitraum zur Datensammlung wird so gewählt, dass die Daten aller relevanten Produktvarianten enthalten sind. Das heißt, dass in diesem Zeitraum jede Produktvariante mindestens einmal gefertigt wurde. Auf Basis dieses Datensatzes werden die in Bild 76 dargestellten Daten gesammelt und aufbereitet. Das jeweilige Vorgehen wird im Folgenden genauer beschrieben.

Die Strukturdaten für das Simulationsmodell bestehend aus dem Layout sowie der Liste aller Einrichtungen werden aus einer Datenbank und dem

MES entnommen. Die Aufgliederung der Stationen in einzelne Arbeitspositionen ist notwendig, da die Produkte mit Hilfe verschiedener Produktionsprozesse auf den Arbeitspositionen bearbeitet werden. Somit können sich die notwendigen Rüstvorgänge einzelner Arbeitspositionen je nach Produktvariantenwechsel unterscheiden. Eine Betrachtung einzelner Stationen wäre demnach nicht präzise genug.

Für die einzelnen Arbeitspositionen liegen im MES keine Prozesszeiten vor. Daher wird der Median der Taktzeit der Arbeitspositionen übernommen. Durch die Verwendung des Medians werden im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert Ausreißer, die durch größere Störungen hervorgerufen werden, ignoriert. Die aus der Taktzeit entfernten Störungseinflüsse werden separat aus den Stationsstillständen als Verfügbarkeiten und MTTR (s. Berechnung in 5.3.3) der einzelnen Stationen aufgenommen. Des Weiteren werden die Ausschussraten je Station auf Basis der in Unterkapitel 5.3.3 dargestellten Berechnung aus den MES-Daten bereitgestellt.

Der grundlegende Ablauf der einzelnen Produktvarianten durch das Untersuchungsobjekt kann auf Basis der Fahrlisten dem MES entnommen werden. Diese werden in einer sogenannten Route-Matrix zusammengefasst. Detaillierte Abläufe werden den Band-, Handhabungs- und Rüststeuerungen der einzelnen SPS entnommen und wie in Bild 39 aufbereitet.

Die Aufbereitung der Daten zur Abbildung der Rüstprozesse erfolgt in mehreren Schritten. Zuerst werden auf Basis der Typdaten der einzelnen Produktvarianten die bei einem Rüstvorgang notwendigen Wechselteile (W) identifiziert. Diese werden in einer Wechselteilmatrix zusammengeführt. Daraus wird im nächsten Schritt eine Rüstmatrix je Wechselteil (s. Bild 50) erstellt. Darin ist die Information enthalten, ob bei einem Wechsel von Produktvariante A auf Produktvariante B das Wechselteil gewechselt werden muss oder nicht.

Darauf aufbauend werden die Rüstzeiten der einzelnen Wechselteilwechsel analysiert. Es erfolgt demnach keine je Produktvariantenwechsel spezifische Berechnung der Rüstzeit, sondern eine Betrachtung anhand der Wechselteile, da diese dem MES entnommen werden können. Diese werden je Station mit Rüstvorgängen in Rüstzeitmatrizen zusammengefasst. Auf Basis der auszutauschenden Wechselteile wird je Station ein Identifier des jeweiligen Rüstvorgangs gebildet. Die Anzahl an Wechselteilen je Station definiert die Anzahl an Ziffern des Identifiers. Die Reihenfolge der Ziffern stehen aufsteigend für die Wechselteile. Die Ziffer Null bedeutet, dass das Wechselteil beim Rüstprozess nicht ausgetauscht werden muss, eine Eins, dass ein Wechsel durchgeführt werden muss. Für jede mögliche

Wechselteilkombination und somit jeden Identifier werden die für den Rüstprozess notwendigen Mittelwerte der Rüstzeiten inklusive deren Standardabweichungen sowie Minimum- und Maximumwerten gebildet. Hierzu werden die Stationsereignisse aus dem MES analysiert, um die manuellen Rüstzeiten durch Beginn und Ende der manuellen Eingriffe der Fertigungsmitarbeiter aufzunehmen. Eine beispielhafte Rüstzeitmatrix ist in Tabelle 2 dargestellt. Mit Hilfe der Rüstmatrix und der Rüstzeitmatrix sind die einzelnen Rüstprozesse in der Materialflusssimulation je Produktvariantenwechsel eindeutig verfügbar.

Tabelle 2: Rüstzeitmatrix mit zwei Wechselteilen (W_1, W_2) mit Beispielwerten

Identifier	W_1	W_2	Mittelwert	Standardabweichung	Min	Max
00	0	0	0s	0s	0s	0s
01	0	1	40s	5s	28s	56s
10	1	0	80s	10s	55s	134s
11	1	1	110s	10s	85s	141s

Fehlende Daten bei spezifischen Fragen zu Rüstabläufen, die in der Auswertung der SPS-Programme nicht ersichtlich sind, werden durch manuelle Beobachtungen und in Abstimmung mit der Fertigungsplanung erhoben. Im vorliegenden Untersuchungsobjekt werden insgesamt 81 Produktvarianten implementiert. Alle gesammelten und aufbereiteten Daten werden der parallel zur Datenbeschaffung und -aufbereitung durchzuführenden Modellierung außerhalb der Simulationsumgebung (s. Variante 1 in Bild 53) bereitgestellt.

7.1.4 Modellierung des ereignisdiskreten Simulationsmodells

Das Ziel der Modellierung ist die Erstellung eines lauffähigen Simulationsmodells durch den Simulationsexperten. Hierfür wird initial die Systemgrenze des Modells festgelegt. Für das Untersuchungsobjekt wird, wie in Bild 77 dargestellt, direkt an den Stationen des automatisierten Produktionssystems geschnitten. Demnach wird der Transport der Zuführteile an die Stationen sowie der Abtransport der fertigen Produkte zum Supermarkt nicht simuliert. Diese Vereinfachung ist akzeptabel, da durch große Puffer an den Zuführeinheiten der Stationen die Transportaufträge selten auftreten. Die für die zu untersuchenden Anwendungsfälle wichtigen Rüstprozesse, bei denen die Zuführteile gewechselt werden müssen, werden über

die Rüstmatrizen an den Zuführeinheiten mit abgebildet, wodurch lediglich die weniger zeitintensiven Laufwege zum Supermarkt vernachlässigt werden. Die Systemgrenze ist somit für die Modellierung des Untersuchungsobjekts für dessen Ramp-down akzeptabel.

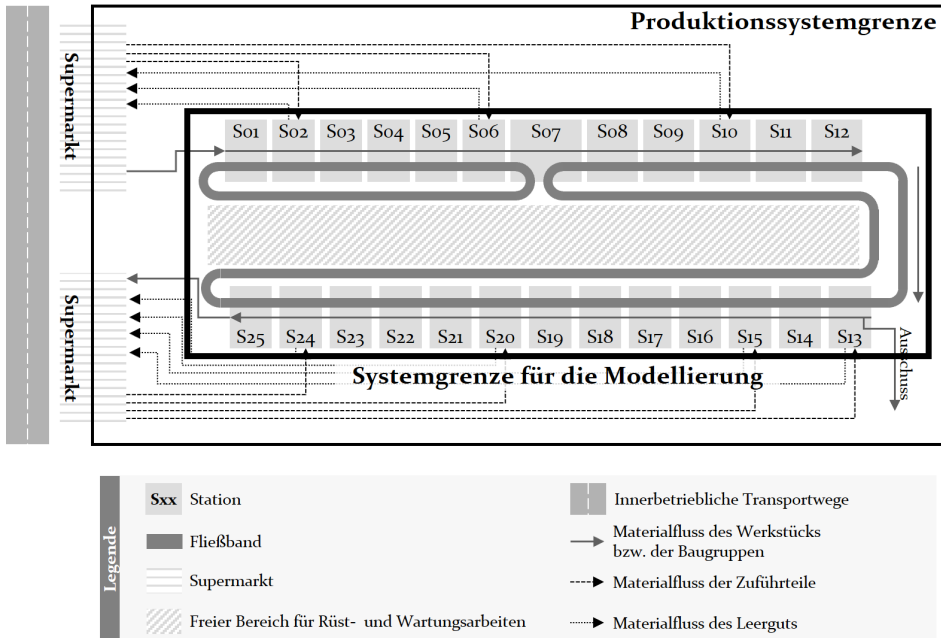


Bild 77: Systematische Darstellung eines automatisierten Produktionssystems mit eingetragener Systemgrenze für die Modellierung des Untersuchungsobjekts

Die Modellierung des Untersuchungsobjekts erfolgt anhand des in Bild 41 dargestellten erweiterten Metamodells. Hierbei wird die Materialflusssimulationssoftware Plant Simulation verwendet. Bild 78 zeigt die systematische Umsetzung der Elemente des Metamodells im Simulationsmodell. Demnach bilden die Stationen mit ihrer Stationssteuerung den Rahmen für die einzelnen Fertigungs-, Montage- und Zuführeinheiten. Für die Störungsbeseitigung sowie die manuellen Rüstprozesse erhalten alle Stationen sowie Zuführeinheiten einzelne Arbeitsplätze, die in der Simulation durch einen Mitarbeiter verwendet werden. Das gesamte Untersuchungsobjekt wird mit insgesamt 44 Stationen, 144 Fertigungs-, Montage- und Zuführeinheiten sowie 55 Arbeitsplätzen modelliert. Des Weiteren werden die für den Materialfluss notwendigen Quellen und Senken an der Systemgrenze eingefügt.

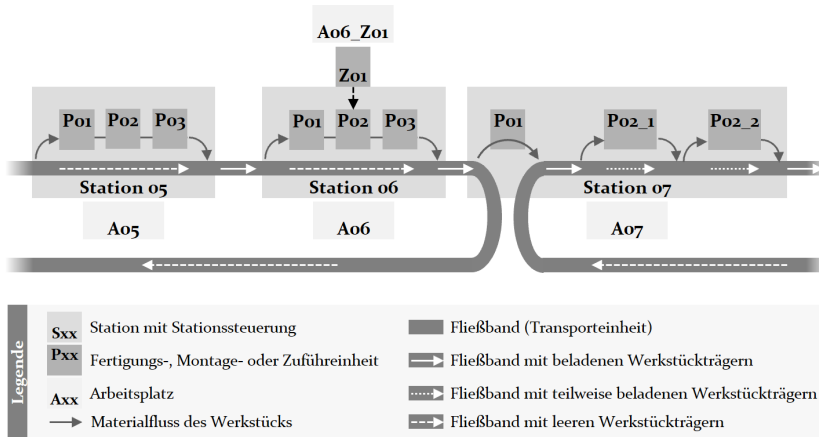


Bild 78: Ausschnitt der Modellierung des Untersuchungsobjekts anhand des erweiterten Metamodells (s. Bild 41)

Die Programmierung des Ablaufs erfolgt anhand der in Methodenschritt (3) bereitgestellten Route-Matrix sowie den aufbereiteten, spezifischen Ablauflogiken. Die Parametrisierung der einzelnen Elemente des Simulationsmodells wird anhand der in Bild 76 dargestellten und wie in Methodenschritt (3) beschrieben aufbereiteten Daten durchgeführt. Bild 79 zeigt das resultierende Simulationsmodell in der Software Plant Simulation.

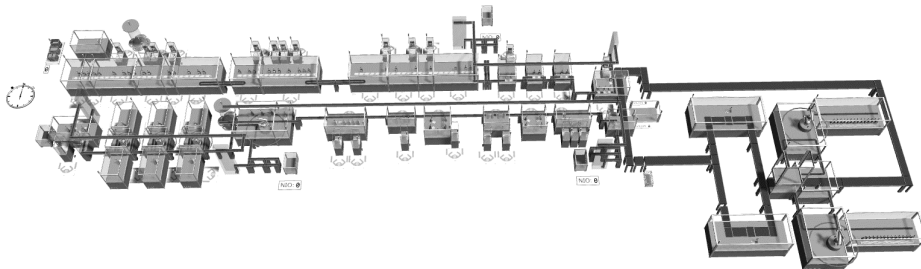


Bild 79: Simulationsmodell des Untersuchungsobjekts in der Software Plant Simulation

7.1.5 Verifikation und Validierung

Die Verifikation und Validierung erfolgen anhand verschiedener Techniken. So werden die gesammelten Daten mit Hilfe von Expertengesprächen plausibilisiert. Des Weiteren werden die Rüstabläufe sowie der normale Produktionsablauf im Simulationsmodell durch deren Animation mit der Fertigungsplanung validiert. Abschließend wird ein Zeitraum von 45

Schichten je 8h simuliert und die Ergebnisse anhand der OEE mit der Realität verglichen. Bild 8o zeigt den Boxplot der OEE der Realität sowie der Simulation mit und ohne Pausendurchlauf der 45 Schichten. Die Betrachtung der Simulation mit und ohne Pausendurchlauf ist notwendig, da in der realen OEE-Berechnung des Untersuchungsobjekts die Produktion in Pausenzeiten zumeist weiterläuft, die geplante Produktionszeit für die Berechnung der OEE jedoch nicht angepasst wird. Demnach werden im Folgenden die Ergebnisse der Simulation mit Pausendurchlauf herangezogen.

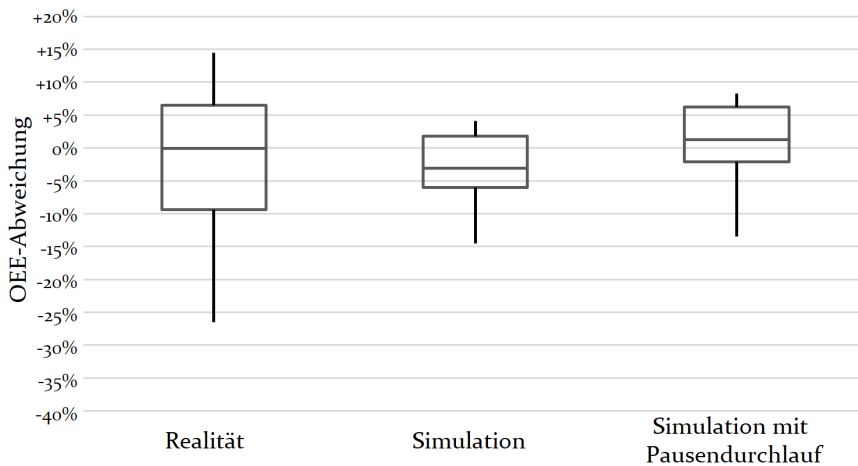


Bild 8o: Abweichung der OEE von der Realität zur Simulation ohne und mit Pausendurchlauf

Der Unterschied zwischen Realität und Simulation mit Pausendurchlauf im Median der OEE beträgt circa 1,4%. Dieser ist auf den real auftretenden aber nur partiell stattfindenden Pausendurchlauf zurückzuführen. Die geringere Varianz in der Simulation ist hauptsächlich auf die fehlende Berücksichtigung organisatorischer Stillstände zurückzuführen. Nach der Diskussion der Ergebnisse wird das Simulationsmodell als validiert bewertet.

7.1.6 Anwendung der ereignisdiskreten Materialflusssimulation in der Ramp-down Planung

Nach erfolgreicher Verifikation und Validierung werden die in der Zieldefinition festgelegten, drei Anwendungsfälle UC₁₋₃ durchgeführt. Im Folgenden werden Anwendungsfälle UC₁₋₃ einzeln mit den Schritten Experimentevorbereitung, -durchführung und Bereitstellung von Handlungsempfehlungen erläutert.

Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße

Für die Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße (UC1) werden die minimale Losgröße L_{min} und maximale Losgröße L_{max} sowie die Schrittweite S wie folgt definiert:

$$L_{min} = 100 \quad L_{max} = 2000 \quad S = 100$$

Daraus ergibt sich ein Versuchsplan mit $n_V=20$ Versuchen. Da die Auswirkungen der Losgrößenänderungen auf den Status Quo betrachtet werden sollen, wird die vorhandene Mitarbeiteranzahl von 3 Mitarbeitern festgelegt. Der Produktionsplan besteht aus zufällig ausgewählten Produktvarianten, wie er auch in der Realität vorkommen kann. Aufgrund der stochastischen Einflussgrößen werden je Versuch zehn Observationen durchgeführt, wodurch insgesamt 200 Simulationsläufe durchgeführt werden.

Bild 81 zeigt die Ergebnisse des vom Simulationsexperten durchgeführten Experiment der Losgrößenbetrachtung. Es sind die Verteilungen der OEE-Abweichungen der betrachteten Losgrößen im Vergleich zur aktuellen Situation dargestellt. Die OEE bewegt sich bis zu einer Losgröße von 700 in einem Band von 0% bis -10%. Ab einer Losgröße von 600 ist ein deutlicher Abfall der OEE zu erkennen. Bei der Losgröße 100 beträgt der OEE-Verlust über 40%. Dies zeigt, dass die Losgröße und die damit verbundene Häufigkeit der Rüstvorgänge einen starken Einfluss auf die OEE des Produktionssystems haben. Mit den aktuellen Randbedingungen kann somit ohne größere Verluste bis zu einer Losgröße von 700 produziert werden. Bei Losgrößen kleiner 700 müssen Anpassungen in der Mitarbeiteranzahl vorgenommen werden, um das drastische Absinken der OEE zu vermeiden.

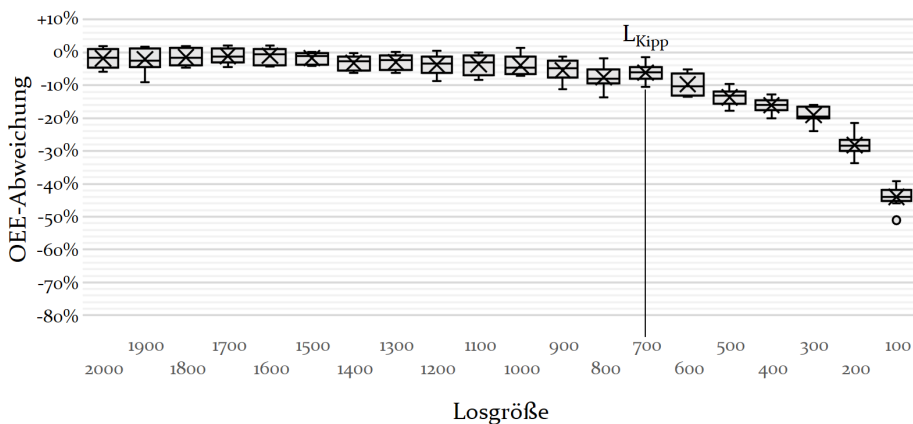


Bild 81: Auswertung der OEE-Abweichung bei sinkender Losgröße und drei Mitarbeitern

Optimierung der Auftragsreihenfolge

Die Optimierung der Auftragsreihenfolge wird in zwei Ausführungen bereitgestellt. Nach Festlegung eines Produktionsplans mit zwei bis sechs Produktvarianten und dazugehörigen Losgrößen werden sowohl vollfaktorielle Versuchspläne erstellt sowie ein genetischer Optimierer parametrisiert. Hierfür wird der in der Software Plant Simulation verfügbare Baustein zur genetischen Optimierung verwendet. Die Durchführung der genetischen Optimierung in Kombination mit der Simulation erlaubt im Vergleich zum Vollfaktorplan aufgrund der geringeren Anzahl an durchzuführenden Simulationsläufen ein schnelleres Ergebnis. Dies ist vor allem beim wiederholten, tagesaktuellen Einsatz durch die Fertigungsplanung von Vorteil.

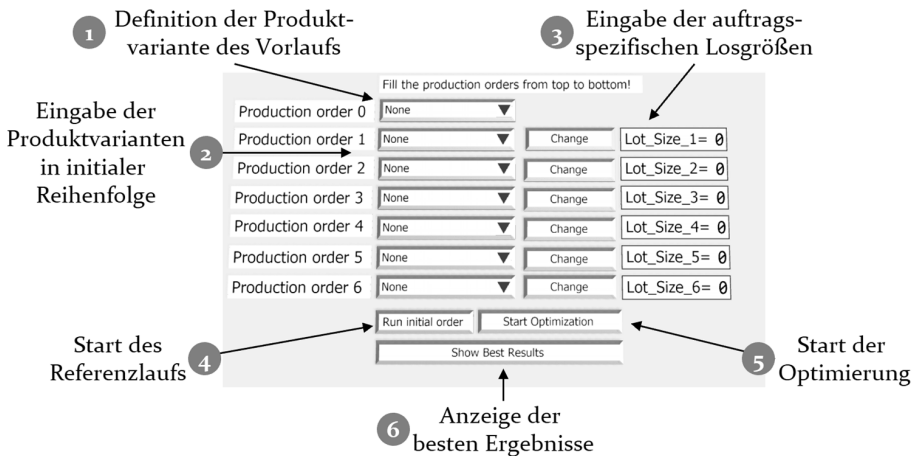


Bild 82: Grafische Benutzeroberfläche zur wiederholten Durchführung der Optimierung der Auftragsreihenfolge

Die hierfür erstellte grafische Benutzeroberfläche ist in Bild 82 zu sehen. Sie erlaubt die Definition einer Produktvariante für das initiale Befüllen des Produktionssystems. Dies ist notwendig, da das Produktionssystem im Betrieb normalerweise nie leergefahren wird, wodurch bei der Optimierung der Auftragsreihenfolge die zuletzt verwendete Produktvariante beachtet werden muss. Die für die Befüllung des Produktionssystems notwendige Zeit wird in der Auswertung der Auftragsreihenfolge exkludiert. Anschließend können die zu untersuchenden Produktvarianten mit Hilfe eines Drop-Down Menüs ausgewählt sowie die dazugehörigen individuellen Losgrößen eingegeben werden.

Bei Bedarf kann die eingegebene Auftragsreihenfolge als sogenannter Referenzlauf durchgeführt werden. Mit Hilfe des Buttons „Start Optimierung“ wird die Optimierung automatisiert gestartet. Falls mehr als drei Produktvarianten angegeben sind, wird automatisiert die hinterlegte genetische Optimierung parametrisiert und gestartet. Bei drei oder weniger Produktvarianten wird ein vollfaktorierter Versuchsplan erstellt und durchgeführt. Nach Beendigung der Simulation können die besten Ergebnisse in Abhängigkeit der Simulationszeit angezeigt werden. Die Anwendbarkeit und einfache Handhabbarkeit der grafischen Benutzeroberfläche wird durch den Fertigungsplaner des Projektteams, der keine Erfahrung im Bereich der Materialflusssimulation besitzt, bestätigt.

Die Ergebnisse einer durchgeführten Optimierung der Auftragsreihenfolge mit fünf Aufträgen ist in Tabelle 3 dargestellt. Eine tägliche Produktion von fünf verschiedenen Produktvarianten stellt für das Untersuchungsobjekt ein realistisches Ramp-down Szenario dar. Die Ziffern in den Spalten der Typen A bis E geben an, an welcher Stelle des Produktionsplans der jeweilige Typ steht. Zur Bestimmung der besten Reihenfolge wird die absolute Abweichung der Simulationszeit im Vergleich zur Referenzreihenfolge angegeben. Die Anpassung der Auftragsreihenfolge hat das Potential, die benötigte Zeit zur Fertigung der gleichen Menge an Produkten im Zeitraum eines Produktionstages um über 14 min zu reduzieren.

Tabelle 3: Die drei besten Ergebnisse einer beispielhaften Reihenfolgeoptimierung der Typen A bis E im Vergleich zum Referenzlauf

Ergebnis	Abweichung der Simulationszeit	Typ A	Typ B	Typ C	Typ D	Typ E
Referenz	00min 00s	1	2	3	4	5
1	-14min 09s	3	4	5	1	2
2	-13min 12s	1	3	5	4	2
3	-12min 05s	1	4	5	3	2

Optimierung des Mitarbeiterereinsatzes

Wie in der Zieldefinition in Methodenschritt (1), soll der Mitarbeiterereinsatz (UC₃) einmalig untersucht werden. Da die Rüstvorgänge hauptsächlich durch Mitarbeiter durchgeführt werden, kann die Anpassung der Mitarbeiteranzahl der sinkenden OEE entgegenwirken. Hierzu wird im Extremfall von einer festen Losgröße von 100 in einem Versuchsplan die Anzahl der Mitarbeiter von 1 bis 10 variiert. Hierfür wird der gleiche Produktionsplan wie in der Losgrößenbetrachtung herangezogen. Durch die Beachtung der stochastischen Einflussgrößen werden wiederum 10 Observationen durchlaufen. Demnach werden insgesamt 100 Simulationsläufe durchgeführt.

7.1 Ramp-down Planung für den auslaufenden Serienbetrieb eines automatisierten, variantenreichen Produktionssystems

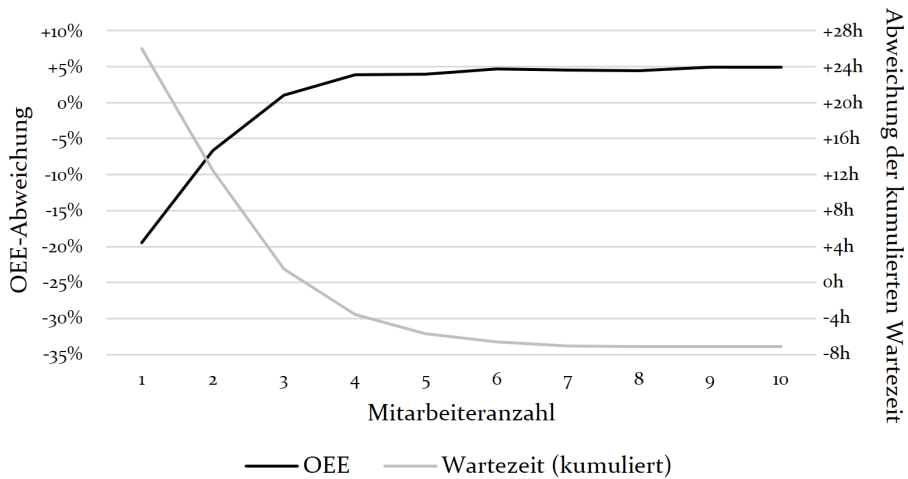


Bild 83: Auswertung der OEE- und Wartezeitabweichung über der Mitarbeiteranzahl bei einer Losgröße von 100

Bild 83 zeigt die Ergebnisse in der Zielgröße OEE sowie der kumulierten Wartezeit der Einrichtungen. Hierbei sind neben den Medianen der OEE-Abweichung die Mediane der Abweichungen der kumulierten Wartezeiten der einzelnen Fertigungs-, Montage- und Zuführeinheiten abgebildet. Die Wartezeiten entstehen, wenn für die Rüstprozesse keine Mitarbeiter an den Fertigungs-, Montage- und Zuführeinheiten zur Verfügung stehen. Als Referenz zur Berechnung der Abweichungen dient der vorherige Zustand mit drei Mitarbeitern.

Es ist zu erkennen, dass die Erhöhung der Mitarbeiteranzahl einen positiven Einfluss auf die OEE vorweist. Gleichzeitig werden die Wartezeiten verringert. Eine Erhöhung der Mitarbeiteranzahl auf vier erhöht die OEE um circa 5% bei gleichzeitiger Senkung der Wartezeiten um circa 4h. Bei der weiteren Erhöhung der Mitarbeiteranzahl können jedoch keine weiteren, nennenswerten Verbesserungen der OEE festgestellt werden, wenngleich die Wartezeit weiter gesenkt wird. Im Gegensatz dazu sind bei Senkung der Mitarbeiteranzahl deutliche OEE-Verluste von bis zu 20% zu erwarten.

Die Ergebnisse der drei Anwendungsfälle UC₁₋₃ sowie die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen werden dem Projektteam vom Simulationsexperten aufbereitet.

7.1.7 Festlegung von Maßnahmen

Auf Basis der Ergebnisse der zuvor beschriebenen Untersuchungen beschließt das Projektteam die folgenden Maßnahmen:

Die Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße hat keine Festlegung von Maßnahmen zur Folge. Das Ergebnis der Analyse verbessert das Verständnis des Projektteams über das Untersuchungsobjekt im Ramp-down. Die kritische Losgröße L_{Kipp} von 700 ist für das Produktionssystem mit den aktuellen Randbedingungen definiert, wodurch das Projektteam die Erkenntnis erlangt hat, dass bei Erreichen dieser, organisatorische Anpassungen des Produktionsbetriebs notwendig sind, um die Produktivität aufrecht zu erhalten.

Das Potential, das die Optimierung der Auftragsreihenfolge aufzeigt, führt dazu, dass die Planung der Auftragsreihenfolge im Ramp-down nicht mehr allein durch die Logistik durchgeführt werden soll, sondern die produktionsbezogenen Eigenschaften durch die Einflussgrößen des Ramp-downs einbezogen werden sollten.

Die Optimierung des Mitarbeiterereinsatzes führt dazu, dass erst bei der im Ramp-down zu erwartenden Losgröße von 100 mit einer Erhöhung der Mitarbeiteranzahl auf vier Mitarbeiter geplant wird. Vor dieser Umsetzung muss der Wertstromverantwortliche eine Gegenüberstellung der Personalkosten mit der Steigerung der Produktivität durch Erhöhung der Mitarbeiteranzahl durchführen. Für das Projektteam ist die Erkenntnis, dass eine weitere Erhöhung der Mitarbeiteranzahl keine weitere Verbesserung der OEE vorweist, wichtig, da somit der Fokus auf die Verbesserung anderer Einflussgrößen gelegt werden kann.

7.1.8 Dokumentation

Im abschließenden Methodenschritt, der Dokumentation, werden alle Erkenntnisse sowie die zu deren Erlangung verwendeten Daten und Modelle archiviert. Da die untersuchte Konstellation im Ramp-down, das Untersuchungsobjekt als letztes automatisiertes Produktionssystem des internationalen Produktionsnetzwerks (s. 7.1.1), noch nicht vorherrscht, müssen die in der Planung gewonnenen Erkenntnisse wiederauffindbar und nachvollziehbar dokumentiert werden, sodass auf diese bei der Durchführung des Ramp-downs zurückgegriffen werden. Hierzu werden die Festlegungen aus den Unterkapiteln 7.1.1 und 7.1.2 zusammen mit den Daten des Digitalen Schattens sowie den Struktur- und Ablaufdaten gespeichert. Bei der Sicherung des Simulationsmodells wird auf eine durchgängige Kommentierung geachtet. Neben den Daten zur Modellerstellung werden die Datensätze der einzelnen Anwendungsfälle separat mit den dazugehörigen Ergebnissen und -visualisierungen archiviert. Hierzu zählen auch die im Projekt-

team gewonnenen Erkenntnisse, Handlungsempfehlungen sowie festgelegte Maßnahmen. Die Dokumentation stellt den Abschluss des Einsatzes des Digitalen Zwillings des Untersuchungsobjekts für die Planung des Ramp-downs dar.

7.2 Beurteilung des Einsatzes des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme

Die der vorliegenden Dissertation zugrunde liegende Forschungsthese besagt, dass der Einsatz des Digitalen Zwillings in der Planung und Optimierung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme bisher ungenutzte Potentiale erschließt. Hierzu zählen eine verbesserte Planung und Durchführung des effizienten Weiterbetriebs bestehender, automatisierter Produktionssysteme, sowie die effiziente Planung potentiell notwendiger Rückbauszenarien, sobald der Weiterbetrieb des bestehenden, automatisierten Produktionssystem nicht mehr möglich ist. Die Forschungsthese wird in Kapitel 4.2 anhand von vier Forschungsfragen genauer spezifiziert. Im Folgenden wird der Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme anhand dieser beurteilt.

F1: Wie kann der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme strukturiert werden, um einen effizienten Weiterbetrieb des Produktionssystems im Ramp-down sowie eine effiziente Rückbauplanung zu ermöglichen?

In Kapitel 5 werden der Aufbau und die Inhalte des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme in deren Ramp-down beschrieben. Die Strukturierung gemäß des DTSM erlaubt die detaillierte Beschreibung dessen Daten und Modelle sowie deren Interaktion. Im Zentrum stehen hierbei das Simulationsmodell sowie der Digitale Schatten. Für die Abbildung der in den bestehenden Ramp-down Managementansätzen weniger beachteten produktionsbezogenen Zusammenhänge wird die ereignisdiskrete Materialflusssimulation eingesetzt. Sie erlaubt die Abbildung der für den Ramp-down spezifischen Herausforderungen im Weiterbetrieb eines automatisierten Produktionssystem. Im Vergleich zu gängigen Anwendungen der ereignisdiskreten Simulation von Produktionssystemen werden die geänderten Anforderungen an die Datengrundlage des Simulationsmodells sowie den Digitalen Schatten dargelegt. Besonderer Fokus liegt hierbei auf der Abbildung des produktvariantenspezifischen Rüstverhaltens. Die An-

wendungsfälle des Digitalen Zwillings im Ramp-down können je nach Implementierung entsprechend des DTSM genauer spezifiziert werden, indem sie anhand der eingeführten Ausprägungen (s. Kapitel 5.4) eingeordnet werden.

F2: Wie kann sichergestellt werden, dass das Simulationsmodell nach dem Ramp-down weiterverwendet und für weitere Fragestellungen erweitert werden kann?

Der Aufbau des Simulationsmodells anhand des erweiterten und angepassten Metamodells (s. Bild 41) erlaubt die Weiterverwendung des gesamten Simulationsmodells sowie einzelner Objekte in weiteren Fragestellungen. Die Modellierung anhand des angepassten Metamodells erlaubt hierbei eine Anpassung an neue Gegebenheiten. Um sicherzustellen, dass die aufgrund einer neuen Fragestellung notwendigen Parameteranpassungen im Simulationsmodell effizient möglich sind, wird der Digitale Schatten inklusive dessen Datenquellen und -aufbereitung in Kapitel 5.3 detailliert. Das in Kapitel 7.1 für die Planung des Ramp-downs erstellte ereignisdiskrete Simulationsmodell wurde im Zuge des Industrieprojekts bereits für weitere Fragestellungen des aktuellen Serienbetriebs verwendet. Demnach sind die Weiterverwendung des erstellten Simulationsmodells und dessen Objekte sowie die Erweiterbarkeit des dargelegten Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down gewährleistet

F3: Wie lässt sich der Digitale Zwilling in der Planung des Ramp-downs des Produktionssystems einsetzen, um bisher ungenutzte Potentiale auszuschöpfen?

Aus Sicht der Produktion ist die Aufrechterhaltung der Produktivität eine der zentralen Herausforderungen im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme. In Kapitel 5.4 werden vier Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme identifiziert. Diese sind die Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße (UC₁), die Optimierung der Auftragsreihenfolge (UC₂), die Optimierung des Mitarbeitereinsatzes (UC₃) sowie die Simulation von Strukturanpassungen (UC₄). Die in Kapitel 6.1 eingeführte Methode DT₄RampDown gibt diesen Anwendungsfällen ein methodisches Grundgerüst. Dieses beinhaltet neben der schrittweisen Vorgehensweise zum Aufbau und Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down eine eindeutige Zuordnung der hierfür notwendigen Kompetenzen und Rollen des Projektteams. Die beispielhafte Implementierung zeigt, dass durch den Einsatz der Methode DT₄RampDown bisher ungenutzte Potentiale erschlossen werden können.

F4: Welchen Einfluss hat der Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down des Produktionssystems auf die übergeordneten, betriebswirtschaftlichen Ansätze?

In Kapitel 6.2 wird die Einordnung des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme in die bestehenden betriebswirtschaftlichen Ansätze des Ramp-down Managements beschrieben. Dies stellt sicher, dass die in der vorliegenden Dissertation entwickelten Ergebnisse keine Insellösungen darstellen. Die vorliegende Methode DT4RampDown wird dieser Anforderung gerecht, indem die Schnittstellen zu den bestehenden, betriebswirtschaftlichen Ramp-down Managementansätzen aufgezeigt werden. Die Methode DT4RampDown kann als Ergänzung der bestehenden Ramp-down Managementansätze gesehen werden, indem sie die Auswirkungen der übergeordneten, betriebswirtschaftlichen Entscheidungen auf den Betrieb des automatisierten Produktionssystems im Ramp-down aufzeigt.

Die beispielhafte Anwendung der Methode DT4RampDown inklusive der Implementierung eines Digitalen Zwillings eines automatisierten, variantenreichen Produktionssystems in Kapitel 7.1 bestätigen die erforschten Inhalte der vorliegenden Dissertation. Anhand der Implementierung der drei Anwendungsfälle UC1-3 in einem Industrieprojekt wird darüber hinaus die Praktikabilität der Strukturierung des Digitalen Zwillings im Ramp-down sowie dessen Umsetzbarkeit in der Industrie aufgezeigt. Auf Basis dessen wird geschlossen, dass der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme in der Planung und Durchführung im Ramp-down bisher ungenutzte Potentiale erschließt. Damit kann die Forschungsthese der vorliegenden Dissertation als bestätigt eingestuft werden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Durch kürzere Produktlebenszyklen nimmt die Anzahl an Ramp-ups und Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme zu. Während der Serienhochlauf ein bereits intensiv beforschtes Themengebiet darstellt, ist die Planung und Durchführung des Ramp-downs bisher wenig beforscht. Der Großteil bestehender Forschungsarbeiten fokussiert die betriebswirtschaftliche Betrachtung des Ramp-downs. Hierbei stehen übergeordnete Fragestellungen wie die optimale Terminierung des Serienauslaufs oder die Bestimmung der Menge zur Restbevorratung im Fokus. Für die Planung und Durchführung des Ramp-downs aus Sicht der Produktion mit den produktionsbezogenen Herausforderungen des Ramp-downs bestehen bislang keine expliziten Lösungen. Daher besagt die Forschungsthese der vorliegenden Dissertation, dass der Einsatz des Digitalen Zwillinges in der Planung und Optimierung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme bisher ungenutzte Potentiale erschließt.

Um die Forschungsthese zu verifizieren, werden zwei Teilziele benannt. Als Grundlage der Untersuchung soll der simulationsbasierte Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme beschrieben werden. Des Weiteren soll eine Methode für den Einsatz simulationsbasierter Digitaler Zwillinge in der Planung und der Durchführung des Ramp-downs erstellt werden. Da diese den Ramp-down aus Sicht der Produktion betrachtet, soll die entwickelte Methode in die bestehenden, übergeordneten Ansätze der aktuellen Forschung eingeordnet. Die Forschungsthese wird auf Basis der Zusammenführung der Potentiale des simulationsbasierten Digitalen Zwillinges mit den produktionsbezogenen Herausforderungen des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme anhand von vier Forschungsfragen weiter konkretisiert. Sie besagt, dass durch den Einsatz des Digitalen Zwillinges in der Planung und Optimierung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme bisher ungenutzte Potentiale erschlossen werden können.

Der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme zur Planung und Durchführung des Ramp-downs basiert auf einem ereignisdiskreten Simulationsmodell. Dieses beinhaltet für automatisierte Produktionssysteme charakteristische sowie für den Ramp-down spezifische Eigenschaften. Hierzu zählen beispielsweise ein produktvariantenspezifische Rüstverhalten sowie produktvariantenspezifische Prozesszeiten. Die für die Parametrierung des Simulationsmodells notwendige Daten werden dem Digitalen Schatten des automatisierten Produktionssystems entnommen. Darauf

aufbauend werden erstmalig vier Anwendungsfälle Digitaler Zwillinge automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down eingeführt: Die Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße, die Optimierung der Auftragsreihenfolge, die Optimierung der Mitarbeiterereinsatzes sowie die Simulation von Strukturanpassungen im Ramp-down.

Die für den Ramp-down charakteristische Senkung der zu produzierenden Losgröße stellt die Produktion vor die Herausforderung, die Produktion effizient fortzuführen. Mit Hilfe des in der vorliegenden Dissertation konzipierten Digitalen Zwillings lässt sich die minimale Losgröße bestimmen, die das automatisierte Produktionssystem mit den vorherrschenden oder geplanten Randbedingungen wirtschaftlich produzieren kann. Der Digitale Zwillings ermöglicht hiermit einen detaillierteren Einblick in die Auswirkungen des Ramp-downs auf die Produktion und erlaubt gleichzeitig eine der Situation angepasste, vorausschauende Planung des Ramp-downs.

Neben der reinen Reduktion der Losgrößen sind die je nach Produktvariantenwechsel spezifischen Rüstprozesse entscheidend für eine effiziente Produktion. Der Digitale Zwillings erlaubt hierbei die Optimierung der Auftragsreihenfolge unter Beachtung der produktvariantenwechselspezifischen Rüstprozesse und -zeiten. Dies erlaubt die Optimierung des Produktionsbetriebs im Ramp-down ohne Anpassungen des Mitarbeiterereinsatzes oder struktureller Umbauten des automatisierten Produktionssystems.

Die durch den Ramp-down zunehmenden manuellen Tätigkeiten werden durch Mitarbeiter durchgeführt. Der dritte Anwendungsfall des Digitalen Zwillings im Ramp-down erlaubt die Optimierung des Mitarbeiterereinsatzes. Hierbei kann sowohl die Mitarbeiteranzahl an sich als auch die individuelle Qualifikation der Mitarbeiter optimiert werden. Die Zielgrößen sind hierbei die OEE sowie die Mitarbeiterproduktivität. Der Einsatz des Digitalen Zwillings macht deutlich, wo im automatisierten Produktionssystem die manuellen Tätigkeiten zunehmen und erlaubt durch die Einbindung der Mitarbeiter eine bessere Mitarbeiterereinsatzplanung.

Bedingt durch den Ramp-down eines automatisierten Produktionssystems können strukturelle Anpassungen notwendig sein, um eine effiziente Produktion gewährleisten zu können. Diese lassen sich anhand der sogenannten Rückbauprinzipien einteilen. Der Einsatz des Digitalen Zwillings erlaubt hierbei die Bewertung verschiedener Szenarien, indem diese mit Hilfe des ereignisdiskreten Simulationsmodells abgebildet werden. Hierfür erfolgt die Parametrierung anhand aktueller Daten aus dem Digitalen Schatten oder mittels Plandaten. Die Bewertung erfolgt hierbei anhand gängiger KPI wie der OEE.

Um diese Anwendungsfälle des Digitalen Zwillings zu realisieren, wird die Methode DT4RampDown für den Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down vorgestellt. Diese beinhaltet acht Schritte, die den Anwender von der Zieldefinition über die Erstellung des ereignisdiskreten Simulationsmodells bis zu der Interpretation und Dokumentation der Ergebnisse begleitet. Darüber hinaus wird das für die Durchführung der Methode erforderliche Projektteam anhand der zu besetzenden Rollen definiert.

Der in dieser Dissertation beschriebene Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down stellt im aktuellen Forschungskontext keine Insellösung dar. Vielmehr ergänzt er die bestehenden, meist betriebswirtschaftlichen Ramp-down Managementansätze, indem produktionspezifische Auswirkungen transparent werden und auf Basis derer der Ramp-down in des automatisierten Produktionssystem geplant werden kann.

Die Methode für den Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down automatisierter Produktionssysteme sowie der hierfür benötigte Digitale Zwilling werden anhand einer realen, automatisierten Serienproduktion der Automobilzuliefererindustrie validiert. Dabei werden die Losgrößen-, Auftragsreihenfolgen- und die Mitarbeiterereinsatzplanung für den Ramp-down des automatisierten Produktionssystem mit Hilfe des Digitalen Zwillings durchgeführt. Hierbei wird der Nutzen des Digitalen Zwillings in der Planung des Ramp-downs automatisierter Produktionssysteme deutlich. Die Anwendung des erweiterten und angepassten Metamodells bei der Erstellung des Digitalen Zwillings erlaubt zudem die Weiterverwendung des Simulationsmodells für weitere Fragestellungen, beispielsweise im aktuellen Serienbetrieb. Die beispielhafte Implementierung des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssysteme im Ramp-down zeigt erstmalig, dass die Planung des Ramp-downs mit Hilfe des Digitalen Zwillings verbessert werden kann. Darüber hinaus kann die anstehende Durchführung des Ramp-downs durch die Bereitstellung des Digitalen Zwillings zur automatisierten Optimierung der Auftragsreihenfolge unterstützt werden. Somit gilt die der Dissertation zugrunde liegende Forschungsthese als verifiziert.

In der vorliegenden Dissertation liegt der Fokus des Einsatzes des simulationsbasierten Digitalen Zwillings auf der Abbildung der Produktion mit den dazugehörigen, produktionsbezogenen Herausforderungen. Hierbei wird das Produktionssystem mit seiner Systemgrenze an den Supermärkten betrachtet. Die Erweiterung des vorgestellten Ansatzes auf die Abbildung gesamter Produktwertströme inklusive der Lager und Intralogistik zu den Produktionssystemen stellt ein vielversprechendes Themengebiet für weitere Forschungsarbeiten dar. Zum einen kann hiermit der Zielkonflikt

zwischen den aus Sicht der Logistik gering zu haltenden Lagerbeständen sowie der aus Fertigungssicht hoch zu haltenden Produktivität in einem geschlossenen Modell abgebildet und anhand der insgesamt auftretenden Kosten bewertet werden. Zum anderen ermöglicht die holistische Betrachtung des Wertstroms im Ramp-down weitere, neuartige Planungsansätze, indem beispielsweise die Aufgabenbereiche der Mitarbeiter der Fertigung und Logistik gemäß den Anforderungen des Ramp-downs zusammengeführt und neu, wertstromorientiert ausgelegt werden können, um einen möglichst kostengünstigen Produktionsbetrieb im Ramp-down zu realisieren.

Neben den skizzierten methodischen Weiterentwicklungen besteht weiteres Potential in der Automatisierung des Erstellungsprozesses des Digitalen Zwillings. Während in der vorliegenden Dissertation die Modellierung des Simulationsmodells anhand eines Metamodells manuell durchgeführt wird, kann der Modellierungsprozess weiter automatisiert werden. Grundlage hierfür bilden eine durchgängige, standardisierte Datengrundlage mit den benötigten Struktur- und Ablaufdaten sowie eine standardisierte Datenbank mit den notwendigen Produktionsparametern zu Erstellung des Digitalen Schattens sowie dessen Überführung in das Simulationsmodell. Eine Reduktion der manuellen Aufwände bei der Erstellung des Digitalen Zwillings unterstützt nicht nur dessen Anwendung im Ramp-down, sondern ermöglicht den breiteren Einsatz des Digitalen Zwillings automatisierter Produktionssystem über den gesamten Lebenszyklus hinweg, indem der Fokus auf die Nutzung des Digitalen Zwillings anstatt dessen Erstellung rückt.

9 Summary and outlook

Shorter product life cycles lead to an increasing number of ramp-ups and ramp-downs of automated production systems. Whereas the ramp-up already represents a broad examined research topic, the planning and execution of the ramp-down is still rarely researched. The majority of existing research focus on economic analysis of the ramp-down. Here, determining the optimal termination of the ramp-down and defining the final stocking of products are investigated. For planning and execution of the ramp-down from production's viewpoint including the production-related challenges of the ramp-down, currently no solutions exist. Hence, this dissertation investigates the research topic, if digital twins can be used in planning and executing the ramp-down of automated production systems to exploit new potentials.

To verify the research topic, two targets are created. As a basis for the investigation, the simulation-based digital twin of automated production systems shall be described. Furthermore, a method for the usage of the simulation-based digital twin in planning and execution of the ramp-down shall be created. Finally, this method shall be integrated in the existing economic research approaches. Based on the combination of the potentials of simulation-based digital twins with the production-related challenges of the ramp-down of automated production systems, the research topic is concretized by four additional research questions. It states that the usage of a digital twin in planning and execution of the ramp-down of automated production systems exploits yet unused potentials.

The digital twin of automated production systems for planning and executing the ramp-down is based on an event-discrete simulation model. This includes for automated production systems characteristic and ramp-down specific properties. This includes, for example, a product-variant-specific setup behavior as well as product-variant-specific process times. The data needed for the parametrizing of the simulation model are taken by the digital shadow. Based on this, four use cases of digital twins of automated production systems in the ramp-down are introduced for the first time: the determination of the minimal, efficiently producible lot size, the optimization of the production sequence, the optimization of the worker deployment and the simulation of structural adjustments in the ramp-down.

The reduction of the lot size to be produced, which is characteristic of the ramp-down, presents production with the challenge of continuing production efficiently. Using the digital twin, the minimal lot size that the automated production system can produce economically with the prevailing or planned boundary conditions can be determined. The digital twin thus allows the detailed insight into the effects of the ramp-down on production and at the same time allows a situation-adapted, forward-looking planning of the ramp-down.

Besides the reduction of the lot size, the specific set-up processes depending on the product variant change are crucial for efficient production. The digital twin enables the optimization of the production sequence considering the product variant change specific set-up processes and times. This allows the optimization of production during ramp-down without adaptations in worker deployment nor structural adjustments of the automated production system.

The rising number of manual activities caused by the ramp-down are done by workers. The third use case of the digital twin in the ramp-down enables the optimization of the worker deployment. Both the number of workers themselves as well as their individual qualification can be optimized. The targets here are the OEE and worker productivity. The use of the digital twin makes it clear where manual activities are increasing in the automated production system and allows better worker scheduling through the involvement of the workers.

Due to the ramp-down of an automated production system, reconstruction measures can be necessary, to guarantee an efficient production. These can be classified into the so-called dismantling principles. Here, the usage of the digital twin allows the evaluation of different scenarios by mapping them in the simulation model. Here, the parameterization is based on current data from the digital shadow or by means of plan data. The evaluation is done based on common KPIs such as the OEE.

To realize these use cases of the digital twin, the method DT4RampDown for the use of the digital twin in the ramp-down is presented. The method includes eight steps, that accompany the user from the goal definition to the creation of the event discrete simulation model to the interpretation and documentation of the results. In addition, the project team required to perform the method is defined based on the roles to be filled.

The use of the digital twin in ramp-down described in this dissertation does not represent an isolated solution in the current research context. Rather,

it complements the existing, mostly economic-centered ramp-down management approaches by understanding production-specific effects based on which the ramp-down in production can be planned.

The method DT4RampDown for the usage of the digital twin in the ramp-down of automated production systems as well as the therefore needed digital twin are validated using a real, automated production system of the automotive supplier industry. Here, production sequencing, lot size and worker planning are performed using the digital twin. Thereby, the benefits of the digital twin in the planning of the ramp-down of automated production systems become clear. The application of the extended and adjusted metamodel in the creation of the digital twin allows further use of the simulation model for further questions, for example in current series operation. The exemplary implementation of the digital twin of automated production systems in the ramp-down shows for the first time that the planning of the ramp-down can be improved with the help of the digital twin. In addition, the upcoming execution of the ramp-down can be supported by the provision of the digital twin for the automated optimization of the order sequence. Thus, the stated research topic is verified.

In this dissertation, the focus of the use of the simulation-based digital twin is on the mapping of production with the associated production-related challenges. Here, the production system with its system border at the supermarkets is considered. The extension of the presented approach to the mapping of entire product value streams including warehouses and intralogistics to the production systems represents a promising topic for further research work. On the one hand, the conflict of objectives between the stock levels to be kept low from the point of view of logistics and the productivity to be kept high from the production point of view can be mapped in a closed model and evaluated based on the overall costs incurred. On the other hand, the holistic consideration of the value stream in the ramp-down enables further, novel planning approaches, for example by merging the areas of responsibility of the employees of production and logistics according to the requirements of the ramp-down and designing them in a new, value-stream-oriented manner to realize the most cost-effective production operation possible in the ramp-down.

In addition to the methodological developments outlined above, there is further potential in the automation of the creation process of the digital twin. While in this dissertation the modeling of the simulation model is carried out manually using a metamodel, the modeling process can be further automated. The basis for this is a consistent, standardized data basis

with the required engineering models as well as a standardized database with the necessary production parameters for the creation of the digital shadow and its transfer into the simulation model. A reduction in the manual effort involved in the creation of the digital twin not only supports its application in the ramp-down, but also enables the broader use of the Digital Twin automated production system over the entire life cycle by focusing on the use of the digital twin instead of its creation.

10 Anhang

10.1 Weitere Veröffentlichungen

Tabelle 4: Übersicht weiterer Veröffentlichungen im Rahmen der Tätigkeit am Lehrstuhl FAPS

Nr.	Titel	Quelle
1	Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems	[P5]
2	Advances in energy-related plant simulation by considering load and temperature profiles in discrete event simulation	[P6]
3	Simulationsgestützte Produktionsplanung flexibler Fertigungssysteme	[P7]
4	Accelerated Production Ramp-Up Utilising Clustering and Visualisation of Process Chain Interrelationships	[P8]
5	Effizientes Engineering	[P9]
6	A Concept for Wireless Network Integration in Production System Planning	[P10]
7	Simulation-Based Robot Placement Using a Data Farming Approach	[P11]
8	Data Farming in Production Systems - A Review on Potentials, Challenges and Exemplary Applications	[P12]
9	Einsatz der ereignisdiskreten Materialflusssimulation bei Methoden aus der kontinuierlichen Verbesserung im Fertigungsumfeld: Erfolg und Auswirkungen der Speedweek 4.0	[P13]
10	Building Blocks for Digitally Integrated Process Chains in PBF-Based Additive Manufacturing	[P14]
11	Towards “Design for Interoperability” in the context of Systems Engineering	[P15]

Literaturverzeichnis

- [1] SCHRÖDER, C. Industrielle Arbeitskosten im internationalen Vergleich. *IW-Trends* 2/2019. *IW-Trends*, 2019, 46(2)
- [2] STATISTISCHES BUNDESAMT. *EU-Vergleich der Arbeitskosten (Jahresschätzung)* [online]. *Europa*. 26 April 2023 [Zugriff am: 21. August 2023]. Verfügbar unter: https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Bevoelkerung-Arbeit-Soziales/Arbeitsmarkt/EU_HoeheArbeitskosten.html
- [3] INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. *Deutschland zählt zu den Top-10 automatisierten Ländern weltweit – International Federation of Robotics berichtet*, 27. Januar 2021
- [4] WESTKÄMPER, E., D. SPATH, C. CONSTANTINESCU und J. LENTES. *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013. ISBN 978-3-642-20258-2
- [5] NAGEL, J. *Risikoorientiertes Anlaufmanagement*. Zugl.: Cottbus, Brandenburgische Techn. Univ., Diss., 2010. Wiesbaden: Gabler, 2011. Beiträge zur Produktionswirtschaft. ISBN 978-3-8349-3087-3
- [6] WAGNER, R. *Production phase-out*. Dissertation, 2017. Reihe: Supply chain, logistics and operations management. Band 27. ISBN 978-3-8441-0520-9
- [7] SCHMÖLZER, T. und J. SCHÖFER. Den Rest will keiner haben. Verschlafene Produktausläufe sind Profitvernichter. *Zeitschrift für die gesamte Wertschöpfungskette Automobilwirtschaft (ZfAW)*, 2006(4), S. 76-80
- [8] OSTERTAG, R. *Supply-Chain-Koordination im Auslauf in der Automobilindustrie. Koordinationsmodell auf Basis von Fortschrittszahlen zur dezentralen Planung bei zentraler Informationsbereitstellung*. Dissertation. Wiesbaden: Gabler, 2008. Gabler Edition Wissenschaft Produktion und Logistik. ISBN 978-3-8349-1290-9

- [9] BRACHT, U., D. GECKLER und S. WENZEL. *Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018. VDI-Buch. ISBN 978-3-662-55783-9
- [10] RIEDELSHEIMER, T., P. LÜNNEMANN, S. WEHKING und L. DORFHUBER. *Executive Summary: Digital Twin Readiness Assessment. Eine Studie zum Digitalen Zwilling in der fertigenden Industrie*, 2020
- [11] GUTENBERG, E. *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre. Erster Band Die Produktion*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1951. Enzyklopädie der Rechts- und Staatswissenschaft, Abteilung Staatswissenschaft. ISBN 978-3-662-21965-2
- [12] DYCKHOFF, H. *Produktionstheorie. Grundzüge industrieller Produktionswirtschaft*. 5., überarb. Aufl. Berlin: Springer, 2006. Springer-Lehrbuch. ISBN 3-540-32600-6
- [13] KELLNER, F., B. LIENLAND und M. LUKESCH. *Produktionswirtschaft. Planung, Steuerung und Industrie 4.0*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Gabler, 2020. Lehrbuch. ISBN 978-3-662-61446-4
- [14] NYHUIS, P., G. REINHART und E. ABELE, Hg. *Wandlungsfähige Produktionssysteme. Heute die Industrie von morgen gestalten*. Garbsen: TEWISS, 2008. ISBN 978-3-939026-96-9
- [15] DYCKHOFF, H. und T.S. SPENGLER. *Produktionswirtschaft. Eine Einführung*. 3., überarb. und erw. Aufl. Berlin: Springer, 2010. Springer-Lehrbuch. o. ISBN 978-3-642-13684-9
- [16] KIENER, S., N. MAIER-SCHEUBECK, R. OBERMAIER und M. WEIß, Hg. *Produktionsmanagement*. 11., verbesserte und erweiterte Auflage. Berlin: De Gruyter Oldenbourg, Dezember 2017. De Gruyter Studium. ISBN 978-3-11-046771-0
- [17] SCHENK, M., S. WIRTH und E. MÜLLER. *Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Methoden für die wandlungsfähige, vernetzte und ressourceneffiziente Fabrik*. 2. Aufl. 2014. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-05459-4

- [18] SPATH, D., E. WESTKÄMPER, H.-J. BULLINGER und H.-J. WARNECKE. *Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. VDI-Buch. ISBN 978-3-662-55426-5
- [19] WESTKÄMPER, E. *Einführung in die Organisation der Produktion*. Berlin: Springer, 2006. Springer-Lehrbuch. ISBN 3-540-26039-0
- [20] CHASE, R.B. und N.J. AQUILANO. *Production and operations management. A life cycle approach*. 6. ed. Homewood, Ill.: Irwin, 1992. ISBN 0-256-10039-X
- [21] FRITZ, W., D. von der OELSNITZ und B. SEEGBARTH. *Marketing. Elemente marktorientierter Unternehmensführung*. 5., erweiterte und überarbeitete Auflage. Stuttgart: Verlag W. Kohlhammer, 2019. ISBN 978-3-17-031902-8
- [22] HERRMANN, C. *Ganzheitliches Life Cycle Management. Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-01421-5
- [23] WIENDAHL, H.-P. und H.-H. WIENDAHL. *Betriebsorganisation für Ingenieure*. 9., vollständig überarbeitete Auflage. München: Hanser, 2019. Hanser eLibrary. ISBN 978-3-446-46061-4
- [24] ATTRI, R. und S. GROVER. A comparison of production system life cycle models [online]. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 2012, 7(3), S. 305-311. ISSN 2095-0233. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11465-012-0332-5
- [25] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 5200 Blatt 1: 2011-02, *Fabrikplanung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [26] GRUNDIG, C.-G. *Fabrikplanung. Planungssystematik, Methoden, Anwendungen*. 5., aktualisierte Aufl. München: Hanser, 2014. Hanser eLibrary. ISBN 978-3-446-44157-6
- [27] MÄRZ, L., W. KRUG, O. ROSE und G. WEIGERT. *Simulation und Optimierung in Produktion und Logistik. Praxisorientierter Leitfaden mit Fallbeispielen*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-14536-0

- [28] Verein Deutscher Ingenieure. VDI/VDE 2206: 2020-09, *Entwicklung cyber-physischer mechatronischer Systeme (CPMS)*. Düsseldorf: Beuth Verlag GmbH
- [29] HACKSTEIN, R. *Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. 2., überarb. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1989. ISBN 3-18-400924-6
- [30] SCHUH, G. und C. SCHMIDT, Hg. *Produktionsmanagement*. 2., vollst. neu bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2014. VDI-Buch. 5. ISBN 978-3-642-54288-6
- [31] SCHUH, G., Hg. *Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte*. 3., völlig neu bearb. Aufl. Berlin: Springer, 2006. VDI-/Buch. ISBN 3-540-40306-X
- [32] SCHUH, G. und V. STICH. *Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS*. 4. Aufl. Berlin: Springer, 2012. SpringerLink Bücher. ISBN 978-3-642-25423-9
- [33] LÖDDING, H. *Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration*. 2., erw. Aufl. Berlin: Springer, 2008. VDI. ISBN 978-3-540-76860-9
- [34] DANGELMAIER, W. *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschpralinen?* Heidelberg: Springer, 2009. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-00633-3
- [35] SCHWELLNUß, A.G. 7 Kennzahlen in produzierenden Unternehmen. In: A.G. SCHWELLNUß, Hg. *Produktionscontrolling. Strategie, Investition, Kosten und Kennzahlen*. München: Franz Vahlen, 2021, S. 309-334. ISBN 978-3-8006-6151-0
- [36] VDMA. 66412-1: 2009-10, *Manufacturing Execution System (MES)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [37] AURICH, J.C., C. NAAB und P. BARBIAN. Systematisierung des Serienauslaufs in der Produktion. Ein Konzept zur Abwicklung des Produktionsrückbaus. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2005, **100**(5), S. 257-260
- [38] AURICH, J.C., P. BARBIAN, M. RÖßING und C. NAAB. Flexibilitätspotenziale bei Serienausläufen in der projektorientierten Produktion. Methodisch basiertes Vorgehen zur Identifikation und Umsetzung. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2005, **100**(10), S. 586-590

- [39] HERTRAMPF, F. *Auslaufmanagement in Produktionsnetzen*. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2012. Garbsen: TEWISS, 2012. Berichte aus dem IPH / Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH. 3/2012. ISBN 978-3-943104-72-1
- [40] SCHOLZ-REITER, B., B. BAUMBACH und F. KROHNE. Integriertes Auslaufmanagement. Anforderungen an ein zielorientiertes Kennzahlensystem zur effizienten Durchführung von Produktausläufen. *Industrie Management*, 2008, 24(5), S. 74-78
- [41] GRUSSENMEYER, R., S. GENCAY und T. BLECKER. Production Phase-out During Plant Shutdown [online]. *Procedia CIRP*, 2014, 19, S. 111-116. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2014.05.015
- [42] AURICH, J.C. und C. NAAB. Organization of the Run-Out Phase in Production Projects. *Production Engineering*, 2006, 13(1)
- [43] SCHAUMANN, U.W. *Systematische Produktauscheidung*. Dissertation. Zürich, 1986
- [44] CLARK, K.B. und T. FUJIMOTO. *Product development performance. Strategy, organization, and management in the world auto industry*. Boston, Mass.: Harvard Business School Press, 1991. ISBN 978-0875842455
- [45] NAAB, C. *Auslaufmanagement - Konzept zur Abwicklung des Serienauslaufs in der Produktion*. Zugl.: Kaiserslautern, Techn. Univ., Diss., 2009. Kaiserslautern: Techn. Univ., 2009. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK. 05/2009. ISBN 978-3-941438-26-2
- [46] HERTRAMPF, F. und P. NYHUIS. Terminierung von Produktausläufen in Lieferketten in der Elektronikindustrie. Eine methodische Unterstützung zur Ermittlung eines Auslaufzeitpunkts mit minimalen Auslaufkosten in der Lieferkette. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2009, 104(12), S. 1158-1163
- [47] KIRSCH, T. und W. BUCHHOLZ. An- und Auslaufmanagement. Logistische Herausforderungen am Anfang und Ende des Produktlebenszyklus. *Industrie Management*, 2008, 24(3), S. 45-48
- [48] HILL, R. Production planning towards the end of a product life cycle [online]. *IMA Journal of Management Mathematics*, 1999, 10(2), S. 165-176. ISSN 1471-678X. Verfügbar unter: doi:10.1093/imaman/10.2.165

- [49] AVLONITIS, G., S.J. HART und N.X. TZOKAS. An analysis of product deletion scenarios [online]. *Journal of Product Innovation Management*, 2000, **17**(1), S. 41-56. ISSN 07376782. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0737-6782(99)00010-7
- [50] HARJES, I.-M. Stiefkind Serien-Auslauf. *Automobil Industrie*, 2006, (5), S. 56-57
- [51] BUTLER, M.J., M. SWEENEY und D. CRUNDWELL. Facility closure management: the case of Vauxhall Motors Luton [online]. *International Journal of Operations & Production Management*, 2009, **29**(7), S. 670-691. ISSN 0144-3577. Verfügbar unter: doi:10.1108/01443570910971379
- [52] HOLTSCHE, P. *Planung und Steuerung von Produktionsausläufen in der Elektronikindustrie*. Zugl.: Hannover, Univ., Diss., 2009. Garbsen: TEWISS, 2009. Berichte aus dem IPH / Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH. 03/2009. ISBN 978-3-941416-18-5
- [53] ELBERT, N. *Auslaufmanagement in der Logistik. Untersuchung der Pfadabhängigkeit im Produktlebenszyklus am Beispiel der Automobilindustrie*. Dissertation, 2011
- [54] WAGNER, R., N. ABDELKAFI und T. BLECKER. Exploration of the product phase-out process in manufacturing firms [online]. *Business Process Management Journal*, 2017, **23**(5), S. 1000-1017. ISSN 1463-7154. Verfügbar unter: doi:10.1108/BPMJ-05-2016-0104
- [55] BAUERNHANSL, T., J. KRÜGER, G. REINHART und G. SCHUH. *WGP-Standpunkt Industrie 4.0*. Darmstadt: Fraunhofer-Gesellschaft, 2016
- [56] ASIM FACHGRUPPE 4.5.6. Leitfaden für Simulationsbenutzer in Produktion und Logistik. *ASIM-Mitteilungen*, (7a)
- [57] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 3633 Blatt 1: 2014-12, *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [58] GUTENSCHWAGER, K., M. RABE, S. SPIECKERMANN und S. WENZEL. *Simulation in Produktion und Logistik. Grundlagen und Anwendungen*. Berlin: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-662-55745-7

- [59] WENZEL, S. *Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik. Planung und Durchführung von Simulationsstudien*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-35276-1
- [60] RABE, M., S. SPIECKERMANN und S. WENZEL. *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik. Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-35282-2
- [61] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 3633 Blatt 3: 1997-12, *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [62] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 3633 Blatt 12: 2020-07, *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [63] AMANN, W. *Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen. Mit 50 Abbildungen*. Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 1993. Berlin: Springer, 1994. IWB-Forschungsberichte / Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München. 71. ISBN 978-3-540-57924-3
- [64] FELDMANN, K. *Simulationsbasierte Planungssysteme Für Organisation und Produktion. Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin / Heidelberg, 2000. ISBN 978-3-662-42587-9
- [65] GRIEVES, M. *Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. A Whitepaper by Dr. Michael Grieves*, 2014
- [66] GRIEVES, M. und J. VICKERS. Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems. In: F.-J. KAHLLEN, S. FLUMERFELT und A. ALVES, Hg. *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems*. Cham: Springer International Publishing, 2017, S. 85-113. ISBN 978-3-319-38754-3
- [67] GRIEVES, M. *Intelligent Digital Twins and the Development and Management of Complex Systems* [online]. *The "Digital Twin Exists ONLY After There Is A Physical Product" Fallacy*, 2021 [Zugriff

- am: 6. Juli 2023]. Verfügbar unter: https://www.researchgate.net/publication/350822924_Excerpt_From_Forthcoming_Paper_Intelligent_Digital_Twins_and_the_Development_and_Management_of_Complex_Systems_The_Digital_Twin_Exists_ONLY_After_There_Is_A_Physical_Product_Fallacy
- [68] BARRICELLI, B.R., E. CASIRAGHI und D. FOGLI. A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications [online]. *IEEE Access*, 2019, **7**, S. 167653-167671. Verfügbar unter: doi:10.1109/ACCESS.2019.2953499
- [69] KUEHNER, K.J., R. SCHEER und S. STRASSBURGER. Digital Twin: Finding Common Ground – A Meta-Review [online]. *Procedia CIRP*, 2021, **104**, S. 1227-1232. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.11.206
- [70] BOSCHERT, S. und R. ROSEN. Digital Twin—The Simulation Aspect. In: P. HEHENBERGER und D. BRADLEY, Hg. *Mechatronic Futures. Challenges and Solutions for Mechatronic Systems and their Designers*. Cham: Springer, 2016, S. 59-74. ISBN 978-3-319-32154-7
- [71] HEIDEL, R., M. HOFFMEISTER, M. HANKEL und U. DÖBRICH. *Industrie4.0 Basiswissen RAMI4.0. Referenzarchitekturmodell mit Industrie4.0-Komponente*. Berlin: Beuth Verlag GmbH; VDE Verlag GmbH, 2017. DIN. ISBN 978-3-410-26483-5
- [72] KRITZINGER, W., M. KARNER, G. TRAAR, J. HENJES und W. SIHN. Digital Twin in manufacturing: A categorical literature review and classification [online]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, **51(11)**, S. 1016-1022. ISSN 24058963. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ifaacol.2018.08.474
- [73] NEGRI, E., L. FUMAGALLI und M. MACCHI. A Review of the Roles of Digital Twin in CPS-based Production Systems [online]. *Procedia Manufacturing*, 2017, **11**, S. 939-948. ISSN 23519789. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.promfg.2017.07.198
- [74] FRANZEN, J., J. STECKEN, R. PFAFF und B. KUHLENKÖTTER. Using the Digital Shadow for a Prescriptive Optimization of Maintenance and Operation. The Locomotive in the Context of the Cyber-Physical System. In: U. CLAUSEN, S. LANGKAU und F. KREUZ, Hg. *Advances in Production, Logistics and Traffic*. Pro-

- ceedings of the 4th Interdisciplinary Conference on Production Logistics and Traffic 2019*. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 265-276. ISBN 978-3-030-13535-5
- [75] MASSONET, A., R. KIESEL und R.H. SCHMITT. Der Digitale Zwilling über den Produktlebenszyklus [online]. Das Konzept des Digitalen Zwillings verstehen und gewinnbringend einsetzen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2020, **115**(Special), S. 97-100. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.112324
- [76] EIGNER, M. Digitaler Zwilling – Stand der Technik [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2020, **115**(Special), S. 3-6. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.112300
- [77] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 4499 Blatt 1: 2008-02, *Digitale Fabrik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [78] Verein Deutscher Ingenieure. VDI 4499 Blatt 2: 2011-05, *Digitale Fabrik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [79] STEINWASSER, P. *Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessplanung*. Zugl.: Erlangen, Nürnberg, Univ., Diss., 1996. Bamberg: Meisenbach, 1996. Fertigungstechnik - Erlangen. 63. ISBN 3-87525-084-2
- [80] FELDMANN, K., T. SCHMUCK, M. BROSSOG und J. DREYER. Beschreibungsmodell zur Planung von Produktionssystemen. Entwicklung eines Beschreibungsmodells für Produkte, Prozesse und Ressourcen zur rechnergestützten Planung produktions-technischer Systeme. *wt Werkstattstechnik online*, 2008, **98**(3), S. 156-162
- [81] WILDEMANN, H. *Anlaufmanagement. Leitfaden zur Verkürzung der Hochlaufzeit und Optimierung der An- und Auslaufphase von Produkten*. 3. Auflage. München: TCW Transfer-Centrum-Verl., 2004
- [82] COLLISI, T. *Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten*. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2002. Bamberg: Meisenbach, 2002. Fertigungstechnik - Erlangen. 117. ISBN 3-87525-164-4
- [83] WENDT, S. *Home of Fundamental Modeling Concepts* [online] [Zugriff am: 21. August 2023]. Verfügbar unter: <http://www.fmc-modeling.org/home>

- [84] LÜTJEN, M. *Modellierungskonzept zur integrierten Planung und Simulation von Produktionsszenarien entwickelt am Beispiel der CFK-Serienfertigung*. Dissertation. Bremen, 2014
- [85] SIEPMANN, D. Industrie 4.0 – Technologische Komponenten. In: A. ROTH, Hg. *Einführung und Umsetzung von Industrie 4.0. Grundlagen, Vorgehensmodell und Use Cases aus der Praxis*. Berlin: Springer Gabler, 2016, S. 47-72. ISBN 978-3-662-48505-7
- [86] VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE. Cyber-Physical Systems. Chancen und Nutzen aus Sicht der Automation. *VDI-Handlungsfelder*, April 2013
- [87] HOHPE, G., B. WOOLF, K. BROWN, C.F. D'CRUZ, S. NEVILLE, M.J. RETTIG und J. SIMON. *Enterprise integration patterns. Designing, building, and deploying messaging solutions*. 16. printing. Boston: Addison-Wesley, 2004. The Addison-Wesley signature series. ISBN 978-0321200686
- [88] SKOOGH, A., T. PERERA und B. JOHANSSON. Input data management in simulation – Industrial practices and future trends [online]. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, **29**, S. 181-192. ISSN 1569190X. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.simpat.2012.07.009
- [89] SIEBERTZ, K., D. VAN BEBBER und T. HOCHKIRCHEN. *Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE)*. 2. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017. VDI-Buch. ISBN 978-3-662-55743-3

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] SJAROV, M., T. LECHLER, J. FUCHS, M. BROSSOG, A. SELMAIER, F. FALTUS, T. DONHAUSER und J. FRANKE. The Digital Twin Concept in Industry – A Review and Systematization. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: IEEE, 8. September 2020 - 11. September 2020, S. 1789-1796. ISBN 978-1-7281-8956-7
- [P2] LECHLER, T., J. FUCHS, M. SJAROV, M. BROSSOG, A. SELMAIER, F. FALTUS, T. DONHAUSER und J. FRANKE. Introduction of a comprehensive Structure Model for the Digital Twin in Manufacturing. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: IEEE, 8. September 2020 - 11. September 2020, S. 1773-1780. ISBN 978-1-7281-8956-7
- [P3] SJAROV, M., T. LECHLER, E. RUSSWURM, J. FUCHS, F. FALTUS, E. SCHÄFFER, M. BROSSOG und J. FRANKE. Life Cycle of a Digital Resource Twin: Meta-Modeling and Application Example [online]. *Procedia CIRP*, 2021, **104**, S. 1644-1649. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.11.277
- [P4] LECHLER, T., M. ZERREIS, S. SITZ, M. REINHARD und J. FRANKE. Simulation hochautomatisierter Serienproduktion [online]. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2020, **115**(3), S. 123-126. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.112248
- [P5] LECHLER, T., E. FISCHER, M. METZNER, A. MAYR und J. FRANKE. Virtual Commissioning – Scientific review and exploratory use cases in advanced production systems [online]. *Procedia CIRP*, 2019, **81**, S. 1125-1130. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2019.03.278
- [P6] MAYR, A., T. LECHLER, T. DONHAUSER, M. METZNER, E. SCHÄFFER, E. FISCHER und J. FRANKE. Advances in energy-related plant simulation by considering load and temperature profiles in discrete event simulation [online]. *Procedia CIRP*, 2019, **81**, S. 1325-1330. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2019.04.021
- [P7] SELMAIER, A., T. DONHAUSER, T. LECHLER, J. ZEITLER und J. FRANKE. Simulationsgestützte Produktionsplanung flexibler

- Fertigungssysteme. *wt Werkstattstechnik online*, 2019, **109**(4), S. 240-247
- [P8] MEINERS, M., A. MAYR, T. LECHLER und J. FRANKE. Accelerated Production Ramp-Up Utilising Clustering and Visualisation of Process Chain Interrelationships. In: *2019 9th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*: IEEE, 3. Dezember 2019 - 4. Dezember 2019, S. 1-5. ISBN 978-1-7281-4319-4
- [P9] LECHLER, T., G. HOCKE, J. GEIER, S. SITZ, M. REINHARD und J. FRANKE. Effizientes Engineering [online]. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2020, **115**(11), S. 774-778. ISSN 0947-0085. Verfügbar unter: doi:10.3139/104.112457
- [P10] VUKOVIC, P., T. LECHLER und J. FRANKE. A Concept for Wireless Network Integration in Production System Planning. In: *2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*: IEEE, 8. September 2020 - 11. September 2020, S. 1095-1098. ISBN 978-1-7281-8956-7
- [P11] LECHLER, T., G. KREM, M. METZNER, M. SJAROV und J. FRANKE. Simulation-Based Robot Placement Using a Data Farming Approach. In: B.-A. BEHRENS, A. BROSIUS, W. HINTZE, S. IHLENFELDT und J.P. WULFSBERG, Hg. *Production at the leading edge of technology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021, S. 419-428. ISBN 978-3-662-62137-0
- [P12] LECHLER, T., M. SJAROV und J. FRANKE. Data Farming in Production Systems - A Review on Potentials, Challenges and Exemplary Applications [online]. *Procedia CIRP*, 2021, **96**, S. 230-235. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.01.156
- [P13] SITZ, S., M. ZERREIS, T. LECHLER und J. FRANKE. Einsatz der ereignisdiskreten Materialflusssimulation bei Methoden aus der kontinuierlichen Verbesserung im Fertigungsumfeld: Erfolg und Auswirkungen der Speedweek 4.0. In: J. FRANKE und P. SCHUDERER, Hg. *Simulation in Produktion und Logistik 2021. Erlangen, 15.-17. September 2021*. Göttingen: Cuvillier Verlag, 2021, S. 143-156. ISBN 9783736974791
- [P14] SJAROV, M., N. CERIANI, T. LECHLER und J. FRANKE. Building Blocks for Digitally Integrated Process Chains in PBF-Based Additive Manufacturing. In: B.-A. BEHRENS, A. BROSIUS, W. HINTZE, S. IHLENFELDT und J.P. WULFSBERG, Hg. *Production*

at the leading edge of technology. Berlin, Heidelberg: Springer
Berlin Heidelberg, 2021, S. 368-377. ISBN 978-3-662-62137-0

- [P15] SJAROV, M., D. KIßKALT, T. LECHLER, A. SELMAIER und J. FRANKE. Towards “Design for Interoperability” in the context of Systems Engineering [online]. *Procedia CIRP*, 2021, **96**, S. 145-150. ISSN 22128271. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.procir.2021.01.067

Verzeichnis promotionsbezogener studentischer Arbeiten

- [S1] ZERREIS, M. *Entwicklung einer Ramp-Down-Strategie in der hochautomatisierten, variantenreichen Serienproduktion mittels Materialflusssimulation*. Masterarbeit. Erlangen, 20. April 2020
- [S2] MILLER, S. *Entwicklung einer Methodik zur Identifikation von Anwendungsfällen für den zielgerichteten Simulationseinsatz*. Projektarbeit. Erlangen, 1. Oktober 2020
- [S3] WÖLKI, F. *Mitarbeiterplanung im Ramp-Down hochautomatisierter Serienproduktion mittels Materialflusssimulation*. Bachelorarbeit. Erlangen, 12. November 2020
- [S4] BERTLEFF, A. *Potentiale der ereignisdiskreten Materialflusssimulation im Ramp-Down Management*. Projektarbeit. Erlangen, 30. März 2021
- [S5] STAFFEN, P. *Optimierung von Rüststrategien automatisierter Serienfertigung mittels Materialflusssimulation*. Projektarbeit. Erlangen, 20. Juli 2021
- [S6] EHRLICH, S. *Evaluierung bestehender Möglichkeiten für die simulationsgestützte Planung des Mitarbeitereinsatzes in Produktionssystemen*. Projektarbeit. Erlangen, 12. November 2020

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2024):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.
1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.
1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.
1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.
1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.
1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.
1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.
1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.
1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.
1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.
1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.
1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.
1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.
1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998. ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hergestoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000. ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungs- und Fertigungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionsysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG-Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Triologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme

FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen

LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.
2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrkriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuer

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert

Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler

Prozessdynamik beim Laserstrahl-schweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metalldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Borschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ₃₁B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöllner
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.
ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.
ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.
ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißerimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.
ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobiler Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merkl

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethode zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrostrukturen für geschmierte tribologische Kontakte KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022. ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop

FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 8 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramiken
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugroboter-system für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungs-automatisierung
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünns-ter Verpackungsstähle: Entwick- lung einer geeigneten Charakteri- sierungs- und Validierungsstrate- gie
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbe- einträchtigte Personen
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel

Lutz
Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehr- fach überrollter elasto-plastischer Kontakte
KTmfk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-713-5.

Band 434: Sebastian

Wiesenmayer
Untersuchungen zur Stofffluss- steuerung beim Fügen durch Um- formen von hochfesten Alumini- umlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstel- lung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-717-3.

Band 436: Martin Roth

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation
KTmfk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-719-7.

Band 437: Stephan Schirdewahn

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärte- prozess durch Verwendung maß- geschneiderter laserimplantierter Werkzeuge
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-721-0.

Band 438: Andreas Rohrmoser

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaa- rung Metall-Kunststoff
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-723-4.

Band 439: Andreas Selmaier

DMAICS-Zyklus zur Digitalisie- rung in produzierenden Unternehmen
FAPS, xv u. 185 Seiten, 73 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-733-3.

Band 440: Thomas Kistner

Entwicklung von Modellen der Oberflächenform für die Messunsi- cherheitsbestimmung von taktilen Koordinatenmessungen durch Si- mulation
FMT, xiii u. 134 Seiten, 64 Bilder, 9 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-735-7.

Band 441: Fabian Dworschak

Selbstverstärkendes Lernen als Beitrag zur Automatisierung der Anpassungskonstruktion
KTmfk, x, 205 Seiten, 87 Bilder, 16 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-739-5.

Band 442: Martin Killmann

Vorspannung und Ermüdung von Kaltmassivumformwerkzeugen für unrunde Bauteilgeometrien
LFT, ix u. 160 Seiten, 85 Bilder, 6 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-741-8.

Band 443: Ann-Kathrin Wiemann

Beitrag zur Messunsicherheitser- mittlung für die Messung großer Zahnräder zur Erweiterung des vir- tuellen Koordinatenmessgerätes der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt
FMT, xxiv u. 133 Seiten, 41 Bilder, 22 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-747-0.

Band 444: Andreas Jobst

Eigenspannungen beim Voll-Vor- wärts-Fließpressen – Entstehung, Einstellung und Stabilität
LFT, ix u. 162 Seiten, 89 Bilder, 5 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-749-4.

Band 445: Martin Anton Kraus

Grundlagenwissenschaftliche Un- tersuchungen zum Kaltfließpres- sen kleinster metallischer Pin- Strukturen aus der Blechebene
LFT, x u. 191 Seiten, 64 Bilder, 10 Tab. 2024.
ISBN: 978-3-96147-757-9.

Band 446: Moritz Späth

Assessment of microcirculation
by shifted position-diffuse
reflectance imaging (SP-DRI)
LPT, xi u. 109 Seiten, 37 Bilder, 8
Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-759-3.

Band 447: Benedikt Göddeke

Methode zur Auswahl eines alter-
nativen Blechwerkstoffes für flexi-
bel gewalzte und direkt warmum-
geformte Karosseriestrukturbau-
teile

LFT, xvi u. 222 Seiten, 66 Bilder, 27
Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-762-3.

Band 448: Jan Hafenecker

Systematische Untersuchung zur
Blechumformung von Hybridbau-
teilen

LFT, xxi u. 173 Seiten, 78 Bilder, 6
Tab. 2024.

ISBN 978-3-96147-764-7.

Band 449: Sven Wirsching

Numerische Optimierung von
sekundären, geschmierten Punkt-
und Ellipsenkontakten zur geziel-
ten Auslegung von Rollenlagern

KTmfk, xxv u. 206 Seiten,
70 Bilder, 16 Tab. 2024.

ISBN: 978-3-96147-766-1.

Band 450: Tobias Lechler

Der Digitale Zwilling im Ramp-
down automatisierter Produkti-
onssysteme

FAPS, xvii u. 152 Seiten, 83 Bilder,
4 Tab. 2024

ISBN: 978-3-96147-691-6

Abstract

Shorter product life cycles confront the planning of production systems and their operation with high requirements. A successful ramp-up of the production systems is the basis for the consecutive operation. The increasing amount of production ramp-ups lead at the same time to more production ramp-downs. Especially for automated production systems, at the end of the product life cycle the question comes up, how long the production system is capable to produce efficiently.

This dissertation shows, how the Digital Twin of an automated production system based on an event-discrete simulation model can be used in the planning and operation of the ramp-down. Therefore, the Digital Twin of the automated production system is characterized using a structure model. Furthermore, the central use cases of the Digital Twin during ramp-down are identified. These are the determination of the minimal lot size, which the automated production system can still produce economically, the optimization of the production sequence and of the worker deployment as well as the simulation of structural changes of the automated production system. The usage of the Digital Twin is elaborated by the introduced method DT₄RampDown. The approach is validated by the implementation of an industrial use case which ensures its feasibility.

Kürzere Produktlebenszyklen stellen hohe Anforderungen an die Planung und den Betrieb von Produktionssystemen. Ein gelungener Serienhochlauf, auch Ramp-up genannt, ist die Grundlage für den weiteren Serienbetrieb. Die steigende Anzahl an Serienhochläufen hat jedoch auch eine steigende Anzahl an Serienausläufen, genannt Ramp-down, zur Folge. Gerade bei automatisierten Produktionssystemen stellt sich gegen Ende des Produktlebenszyklus die Frage, wie lange auf dem bestehenden Produktionssystem noch effizient produziert werden kann.

Die vorliegende Dissertation zeigt auf, wie der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme auf Basis der ereignisdiskreten Materialflusssimulation in der Planung und Durchführung des Ramp-downs eingesetzt werden kann. Hierfür wird der Digitale Zwilling automatisierter Produktionssysteme anhand eines Strukturmodells charakterisiert und dessen zentrale Anwendungsfälle im Ramp-down identifiziert. Hierzu zählen die Bestimmung der minimalen, wirtschaftlich produzierbaren Losgröße, die Optimierung der Auftragsreihenfolge und des Mitarbeiterereinsatzes sowie die Simulation struktureller Anpassungen des Produktionssystems. Der Einsatz des Digitalen Zwillings im Ramp-down wird anhand der eingeführten Methode DT4RampDown erläutert. Die Validierung des Vorgehens im industriellen Umfeld stellt die Umsetzbarkeit der Methode sicher.

