

Entwicklung eines Systems zur Produktionsregelung von Cyber-physischen Produktionssystemen

Christoph Berger

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

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub

Prüfende der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Die Dissertation wurde am 17.04.2024 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 19.11.2024 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist in Zeiten globaler Herausforderungen, wie der Klimakrise, dem Mobilitätswandel und der Überalterung der Gesellschaft in westlichen Ländern, für eine nachhaltige Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung. Der Einfluss eines Industriebetriebs auf die Umwelt und die Gesellschaft hängt dabei entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potenziale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen. Dabei muss größtes Augenmerk darauf gelegt werden, möglichst ressourcenschonend, effizient und resilient zu werden, um flexibel im volatilen Produktionsumfeld zu agieren.

Um in dem Spannungsfeld Nachhaltigkeit, Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des iwb ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen des Personals sowie von Nachhaltigkeitsaspekten entwickelt. Die dabei eingesetzten rechnergestützten und Künstliche-Intelligenz-basierten Methoden und die notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades dürfen jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung ökologischer und sozialer Aspekte in alle Planungs- und Entwicklungsprozesse spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des iwb. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Die Steuerung und der Betrieb von Produktionssystemen, die Qualitätssicherung, die Verfügbarkeit und die Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den iwb-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des Institutes

veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und den Anwendenden zu verbessern.

Rüdiger Daub

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation wurde während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer-Institut für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in Augsburg sowie am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München erstellt.

Ein besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, für seine fortwährende Unterstützung während meiner Tätigkeit am Institut sowie für seine konstruktive und wohlwollende Betreuung dieser Arbeit. Ebenso danke ich Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner für die Übernahme des Korreferats und Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Daub für den Vorsitz der Prüfungskommission.

Für die anregenden Diskussionen, wertvollen Hinweise und die gründliche Durchsicht meiner Arbeit möchte ich Jan Klöber-Koch, Karin Berg und meiner Frau einen Dank aussprechen. Des Weiteren danke ich allen Studierenden, die mich im Rahmen meiner Promotionsarbeit mit ihren fachlichen Beiträgen tatkräftig unterstützt haben, insbesondere Alexander Zipfel, Urs Hofmann und Alexander Fetzer. Ein herzliches Dankeschön gilt auch allen Kolleginnen und Kollegen am Institut, mit denen ich gerne auf die gemeinsame Zeit zurückblicke.

Mein Dank geht auch an die Familie Leib und meine Schwester für ihre Unterstützung und Förderung vor und während meines Studiums. Nicht zuletzt möchte ich meiner Frau Julia und meinen beiden Kindern für ihre fortwährende Unterstützung und ihr Verständnis für die zeitliche Beanspruchung während der Ausarbeitung dieser Arbeit danken.

Augsburg,

Christoph Berger

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	v
Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	xi
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Zielsetzung	4
1.3 Aufbau der Arbeit	6
2 Grundlagen.....	9
2.1 Übersicht	9
2.2 Begriffsdefinition	9
2.3 Ereignisse in der Produktion	15
2.3.1 Allgemeines	15
2.3.2 Begriffsdefinition	15
2.3.3 Ereignisse in der Produktion	16
2.4 Produktionsplanung und -steuerung.....	16
2.4.1 Allgemeines	16
2.4.2 Logistische Zielsysteme der Produktionsplanung und -steuerung ...	18
2.4.3 Wirkzusammenhänge der Zielgrößen	19
2.4.4 Grundlagen der Produktionsplanung.....	25
2.4.5 Grundlagen der Produktionssteuerung	26

2.5	Grundlagen der Regelungstechnik.....	30
2.5.1	Allgemeines.....	30
2.5.2	Modellierung von Regelstrecken	31
2.5.3	Erweiterung des Regelungsmodells	32
2.5.4	Bewertung eines Regelkreises.....	34
2.6	Daten- und Informationsmanagement	35
2.6.1	Allgemeines.....	35
2.6.2	Informationssysteme in der Produktion	36
2.6.3	Datenerfassung	37
2.6.4	Bewertung der logistischen Zielgrößen anhand der Betriebsdaten..	37
3	Stand der Forschung	39
3.1	Übersicht.....	39
3.2	Ansätze zur Produktionssteuerung und -regelung	39
3.2.1	Allgemeines.....	39
3.2.2	Multi-Agenten-Systeme	40
3.2.3	Complex Event Processing	41
3.2.4	Produktionsregelung	43
3.3	Informationsmanagement in Produktionssystemen.....	50
3.3.1	Allgemeines.....	50
3.3.2	Informationsstrukturen von Produktionssystemen.....	51
3.3.3	Ansätze der Datenhaltung	53
3.3.4	Übergreifende Architekturkonzepte.....	54
3.4	Zusammenfassung und Ableitung der Anforderungen.....	57

4	Systemübersicht	63
4.1	Allgemeines.....	63
4.2	Systemelemente.....	64
5	Arbeitssystemorientiertes Informationssystem	67
5.1	Übersicht	67
5.2	Referenzarchitektur für die modellbasierte Produktionsregelung	67
5.2.1	Allgemeines.....	67
5.2.2	Public Cloud Services.....	68
5.2.3	Informationssysteme.....	70
5.2.4	Fertigungsressourcen.....	72
5.2.5	Produktionsdatenbank	73
5.2.6	Informationsübermittlung.....	74
5.3	Vorgehensmodell	75
5.3.1	Allgemeines.....	75
5.3.2	Ablaufdiagramm.....	76
5.4	Fazit.....	78
6	Regelungsbasierte Ereignisverarbeitung.....	79
6.1	Übersicht	79
6.2	Entwicklung einer Produktionsregelung.....	79
6.2.1	Allgemeines.....	79
6.2.2	Generierung von Ereignisketten von Arbeitssystemen	80
6.2.3	Beschreibung der Regelstruktur und Wirkmechanismen.....	83
6.2.4	Gestaltung der Regelungsmaßnahmen	86
6.3	Informationsverarbeitung im Produktionsregelkreis	88

Inhaltsverzeichnis

6.3.1	Allgemeines.....	88
6.3.2	Ereignisgesteuerte Regelung.....	88
6.3.3	Erweiterung des Regelkreises.....	89
6.4	Produktionsregelung.....	91
6.4.1	Rückstandsregelung.....	91
6.4.2	Bestandsregelung.....	94
6.4.3	Reihenfolgeregelung.....	95
6.4.4	Regelstruktur in Cyber-physischen Produktionssystemen.....	96
6.5	Fazit.....	100
7	Regelungsbasierte Produktionsmodelle.....	101
7.1	Übersicht.....	101
7.2	Modellklassifizierung.....	101
7.3	Modellbeschreibung der Fertigungsressourcen.....	105
7.3.1	Allgemeines.....	105
7.3.2	Arbeitssystem.....	106
7.3.3	Lagereinheit.....	117
7.3.4	Transporteinheit.....	118
7.4	Produktionsmodellbildung.....	120
7.4.1	Materialflussgerechte Modellierung.....	120
7.4.2	Vernetzung der Produktionsmodelle.....	122
7.5	Fazit.....	123
8	Zielgrößenorientierte Prognoseverfahren.....	125
8.1	Übersicht.....	125
8.2	Klassifizierung von Stabilitätskriterien.....	125

8.2.1	Definition der Stabilität	125
8.2.2	Auswahl der Methode zur Stabilitätsanalyse	129
8.3	Entwicklung einer Zielgrößenprognose	132
8.3.1	Allgemeines	132
8.3.2	Analyse der Zielgrößen	134
8.3.3	Beschreibung der Methode für die Zielgröße.....	138
8.4	Fazit.....	139
9	Technische Umsetzung und Validierung.....	141
9.1	Übersicht	141
9.2	Technische Umsetzung	141
9.2.1	Allgemeines	141
9.2.2	Beschreibung des Fertigungssystems	142
9.3	Anwendung des Systems zur Produktionsregelung	145
9.3.1	Allgemein	145
9.3.2	IT-Architektur und Regelungsstrukturen	145
9.3.3	Modellierung des Fertigungssystems und der Stabilitätskriterien .	147
9.4	Simulationsbegleitende Umsetzung und Validierung.....	151
9.4.1	Allgemein	151
9.4.2	Beschreibung der prototypischen Umsetzung.....	152
9.4.3	Ergebnisse der Simulationsstudie.....	154
9.5	Technisch-Wirtschaftliche Bewertung.....	157
9.5.1	Technische Bewertung	157
9.5.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	159
9.6	Fazit.....	163

10 Zusammenfassung und Ausblick	165
10.1 Zusammenfassung	165
10.2 Ausblick	167
11 Literaturverzeichnis	169
12 Anhang.....	203
12.1 Studienarbeiten	203
12.2 Genutzte Softwareprodukte	204
12.3 Sätze zum Small-Gain-Theorem.....	204

Abkürzungsverzeichnis

A	Auslastung
AMQP	Advanced Message Queuing Protocol
APS	Advanced Planning and Scheduling
AS	Arbeitssystem
AVO	Arbeitsvorgang
BDE	Betriebsdatenerfassung
BK	Betriebskosten
BKT	Betrachtungszeitraum
BKAP	Betriebsmittelkapazität
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
BPMN	Business Process Model and Notation
BVO	Bearbeitungsvorgang
BVS	Bearbeitungsschritt
CEP	Complex Event Processing
CPI	Cyber-physische Infrastruktur
CPP	Cyber-physische Produkt
CPPS	Cyber-physische Produktionssysteme
CPS	Cyber-physische Systeme
CPTS	Cyber-physische Transportsystem
CyProS	Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik
DB	Datenbank
DES	Diskretes Ereignis
DGL	Differenzialgleichung

Abkürzungsverzeichnis

DIN	Deutsches Institut für Normung
DRM	Design Research Methodology
E	Ergebnisbasierte Kommunikationsart
ERP	Enterprise-Resource-Planning
EVS	Ereignisverwaltungssystem
F	Fertigungsressource
FG	Flussgrad
FIFO	First-in-First-out
GE	Geplantes Ergebnis
HMS	Holonic Manufacturing Systems
HTTP	Hypertext Transfer Protokoll
I	Initiale Kommunikationsart
IIRA	Industrial Internet Reference Architecture
IoT	Internet of Things
IoT-A	Internet of Things-Architecture
ISS	Input-to-State stability
IT	Informationstechnologie
K	Kontinuierliche Kommunikationsart
KI	Künstliche Intelligenz
L	Leistung
LA	Lagereinheit
LMS	Lab Management System
MAS	Multi-Agenten-System
MDE	Maschinendatenerfassung

MES	Manufacturing-Execution-System
MQTT	Message Queue Telemetry Transport
MRP	Material Requirements Planning
OEE	Overall Equipment Effectiveness
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
P	Bezugszeitraum
PE	Produktionsereignis
PK	Personalkosten
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PWG	Prozesswirkungsgrad
PKAP	Personalkapazität
RAMI 4.0	Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0
REST	Representational State Transfer
RFID	Radio-Frequency Identification
TRA	Rüstanfang
SE	Störungsereignis
SGT	Small gain theorem
SK	Sachkosten
SOA	Serviceorientierte Architektur
TBE	Termin Bearbeitungsende eines Arbeitsvorganges
TBEV	Termin Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorganges
TE	Transporteinheit
TSN	Time-Sensitive Network
UML	Unified Modelling Language

Abkürzungsverzeichnis

VDI	VDI Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VPN	Virtual Private Network
WIP	Work in Process
ZAU	Auftragszeit
ZDF	Durchführungszeit
ZDL	Durchlaufzeit
ZUE	Übergangszeit

Verzeichnis der Formelzeichen

Große lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	%	Auslastung
AB	--	Abgang
$AS_{Kap,m}$	Std/BKT	Mittlere Leistung des Arbeitssystems
$AS_{Kap,max}$	Std/BKT	Nominale maximale Leistung des Arbeitssystems
B, C	--	Nichtnegative Eingänge
BI_{min}	Std	Idealer Mindestbestand
$BKAP_v$	Std/BKT	Verfügbare Betriebsmittelkapazität
B_m	Std/BKT	Mittlerer Bestand
B_{rel}	%	Relativer Bestand
D	--	Dämpfung
$G(s)$	--	Übertragungsfunktion
H	--	Sprungantwort
K	--	Verstärkung
KAP_{max}	Std/BKT	Maximal mögliche Leistung
K_D	--	Verstärkung Differentialregler
K_I	--	Verstärkung Integralregler
K_P	--	Verstärkung Proportionalregler
L	Std/BKT	Leistung
L_m	Std/BKT	Mittlere Leistung
L_{max}	Std/BKT	Maximal mögliche Leistung
MB_{min}	Std	Minimaler mittlere Bestand

Verzeichnis der Formelzeichen

N	--	<i>Freier Parameter</i>
P	<i>BKT</i>	<i>Länge des Bezugszeitraumes</i>
$PKAB_n$	<i>Std/BKT</i>	<i>Nutzbare Personalkapazität</i>
R_m	<i>BKT</i>	<i>Mittlere Reichweite</i>
T	--	<i>Zeitkonstante</i>
T_D	--	<i>Distanzperiode</i>
TRA	<i>BKT</i>	<i>Rüstzeit</i>
U	--	<i>Umgebung</i>
V_{akt}	<i>Std/BKT</i>	<i>Arbeitssystemzustand</i>
ZAU_m	<i>Std</i>	<i>Mittelwert der Auftragszeit</i>
ZL	<i>BKT</i>	<i>Lagerzeit</i>
ZTR	<i>BKT</i>	<i>Transportzeit</i>
ZU	--	<i>Zugang</i>

Kleine lateinische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
e	--	<i>Regeldifferenz</i>
f_{AVO}	<i>Hz</i>	<i>Abtastfrequenz des Arbeitsvorganges</i>
f_{BVO}	<i>Hz</i>	<i>Abtastfrequenz des Bearbeitungsvorganges</i>
f_{BVS}	<i>Hz</i>	<i>Abtastfrequenz des Bearbeitungsschrittes</i>
f_{smax}	<i>Hz</i>	<i>Maximale Störfrequenz</i>
f_T	<i>Hz</i>	<i>Abtastfrequenz</i>
i, a, l, t	--	<i>Laufvariable</i>
k	--	<i>Variable ($n \in \mathbb{N}$)</i>
m	--	<i>Anzahl ($n \in \mathbb{N}$)</i>
n	--	<i>Endwert</i>
r	--	<i>Rückführungsgröße</i>
s	--	<i>Komplexer Frequenzparameter</i>
s_i	--	<i>Koeffizienten Übertragungsfunktion</i>
t_{aus}	<i>BKT</i>	<i>Zustandsänderungszeit bei ausschalten</i>
t_{ein}	<i>BKT</i>	<i>Zustandsänderungszeit bei einschalten</i>
t_k	--	<i>Abtastzeitpunkt</i>
t_{max}	<i>BKT</i>	<i>Maximale Einsatzdauer</i>
t_{min}	<i>BKT</i>	<i>Minimale Einsatzdauer</i>
t_{rea}	<i>BKT</i>	<i>Reaktionszeit</i>
u	--	<i>Eingangssignal</i>
w	--	<i>Führungsgröße</i>
x	--	<i>Regelgröße</i>

Verzeichnis der Formelzeichen

x^*	--	<i>Gleichgewicht</i>
x_0	--	<i>Anfangswert</i>
x_i	--	<i>Funktion bezüglich der Laufvariable</i>
\hat{x}	--	<i>Maximalwert</i>
y	--	<i>Ausgangssignal</i>
z	--	<i>Störsignal</i>
Δ	--	<i>Determinanten</i>
σ	--	<i>Konstante</i>
$\sigma_f(s)$	--	<i>Sprungfunktion</i>

Griechische Buchstaben

Symbol	Einheit	Bedeutung
$j\omega_{krit}$	$1/s$	<i>Kritische Kreisfrequenz</i>
α_i	--	<i>Koeffizienten Differenzialgleichung</i>
β	--	<i>Beschränkter Eingang</i>
δ	--	<i>Variable</i>
ΔKap	--	<i>Kapazitätsverschiebung</i>
ε	--	<i>Epsilon-Umgebung</i>
τ	s	<i>Zeitprozentwert</i>
ν	--	<i>Beschränkter Eingang</i>

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Das wirtschaftliche Umfeld von produzierenden Unternehmen befindet sich derzeit in einem starken Wandel. Sowohl die Globalisierung der Märkte, als auch gestörte Lieferketten haben erhebliche Auswirkungen auf die Industrie (Kaiser et al. 2021; Fisel und Lanza 2016; Seiter 2016; Abele und Reinhart 2011; Schuh 2011). Unternehmen sehen sich seitens ihrer Kunden mit weiteren Herausforderungen, wie dem Wunsch nach individualisierten Produkten und der hohen Bedeutung der Termintreue, konfrontiert (Vojdani und Zahn 2023; Piontek 2020a; Bogner et al. 2018). Um wettbewerbsfähig zu bleiben und die eigene Marktposition zu sichern, müssen sich Unternehmen weiterentwickeln. Jeder Wandel eröffnet dabei auch Chancen. Es entstehen innovative Lösungen und Technologien. Mit ihnen kann Herausforderungen begegnet und effizient gefertigt werden (Pistorius 2020a; Windelband und Spöttl 2019). Eben jene Unternehmen, die erfolgreich auf Veränderungen des Marktes und auf neue Technologien reagieren, stärken ihre Wettbewerbsfähigkeit und erzielen langfristigen Erfolg (Gut 2023; Klauke 2021; Pistorius 2020a; Windelband und Spöttl 2019).

Der technologische Wandel hat einen erheblichen Einfluss auf Produktionsanlagen und -maschinen. Er ermöglicht eine höhere Wettbewerbsfähigkeit (Pistorius 2020b). Dabei spielt die Digitalisierung der Fertigung eine entscheidende Rolle. Durch die Vernetzung von Produktionsanlagen und -maschinen ergeben sich in der Fertigung neue Möglichkeiten zur Steigerung von Qualität und der Produktionsleistung (Steven et al. 2020). Aber auch die Produktionsplanung und -steuerung (PPS) profitiert von diesem Wandel (Mantravadi und Møller 2019). Die Vernetzung ermöglicht eine bessere Koordination und Steuerung der Produktionsabläufe, was die Wettbewerbsfähigkeit erhöht. Diese gesamte Entwicklung wird unter dem Begriff „Industrie 4.0“ zusammengefasst (Granig et al. 2018; Reinheimer 2017; Diedrich und Riedl 2015; Krueger 2014).

Die Vernetzung in der Fertigung begünstigt die Weiterentwicklung der PPS. Bestehende Planungs- und Steuerungssysteme lassen sich mit Softwarewerkzeugen erweitern, wodurch spezialisierte Softwareprodukte eingebunden werden können. Die Nutzung von Echtzeitdaten und eine gesteigerte Transparenz erleichtern eine informierte Entscheidungsfindung im Hinblick auf bevorstehende Ereignisse und

1 Einleitung

fördern eine präzise Planung. Dadurch kann effektiv auf dynamische Veränderungen während des Fertigungsablaufs reagiert werden. Durch Simulationen können klare Entscheidungen im Vorfeld von notwendigen Umplanungen getroffen werden. Dabei ist die resultierende Transparenz entscheidend, da sie die Effektivität und Effizienz in der gesamten Fertigung unterstützt (Mantravadi und Møller 2019; Bowen et al. 2019).

Es ist von großer Bedeutung, die innerbetrieblichen Abläufe in produzierenden Unternehmen transparent zu gestalten, um den Herausforderungen des Marktes erfolgreich zu begegnen (Huber 2016). Die Rückmeldedaten in Form von Ereignissen aus der Produktion spielen hierbei eine zentrale Rolle (Niemann und Westkämper 2017; Bauernhansl et al. 2014). Allerdings fehlen derzeit Methoden und Systeme, die aus den verfügbaren Informationsquellen aus Anlagen, Maschinen und der Betriebsdatenerfassung (BDE) eine frühzeitige Indikation ermöglichen. Dies ist erforderlich, um rechtzeitig in den Fertigungsablauf eingreifen zu können (Niehues 2016). Die Herausforderungen für regelnde Systeme in der PPS liegen in der Integration von Informationsquellen, z. B. von speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), die in Maschinen oder Anlagen eingebaut sind. Dabei ist zu berücksichtigen, dass zwischen einer Zustandsänderung und der Übertragung der Informationen Verzögerungen von Sekunden bis hin zu mehreren Stunden auftreten können.

Der Eingriff in den Fertigungsablauf ist eine der Aufgaben der Produktionssteuerung (Gronau und Ullrich 2019; Seitz et al. 2019; Kempkes et al. 2018). Sie zeigt jedoch Defizite bei der Verarbeitung von unerwarteten Ereignissen, wie technischen Störungen von Maschinen und deren Auswirkungen auf die gesamte Auftragsabwicklung (Gronau et al. 2019). Einige der Herausforderungen liegen zum einen in der Berechnung der Folgen eines unerwarteten Ereignisses und zum anderen, aufgrund fehlender Modelle, in der Darstellungsweise für den Nutzer (Wang et al. 2018; Piller et al. 2017; Monostori et al. 2007).

Die Verarbeitung und das Erfassen von Ereignissen sind die zentralen Herausforderungen der Produktionssteuerung. Der PPS-Report (Lödding et al. 2019), erstellt von vier produktionstechnischen Instituten im deutschsprachigen Raum, untersucht den aktuellen Stand in der PPS. Eine Onlinebefragung zeigt, dass 84 % der Rückmeldedaten manuell erzeugt werden. Zudem belegen die Zahlen, dass in den meisten Unternehmen keine durchgängige IT-Infrastruktur zur Erfassung von Daten existiert. Im weiteren Verlauf der Studie geben 76 % der Unternehmen an, dass

die Rückmeldungen innerhalb von Minuten und Sekunden aggregiert und ausgewertet werden (Lödding et al. 2019; Nyhuis et al. 2016; Hauptvogel 2015). So lässt sich feststellen, dass Informationen zum Fertigungsablauf in den Unternehmen existieren. Das Erzeugen von Daten und deren Aufnahme gehen mit einem entsprechenden Aufwand einher. 48 % der Unternehmen schätzen diesen Aufwand für die Datenerhebung als hoch oder sehr hoch ein. Im Weiteren zeigte die Studie, dass lediglich 10 % (vgl. Abbildung 1) der Daten für eine betriebsbegleitende Simulation bzw. Prognosen genutzt werden (Lödding et al. 2019).

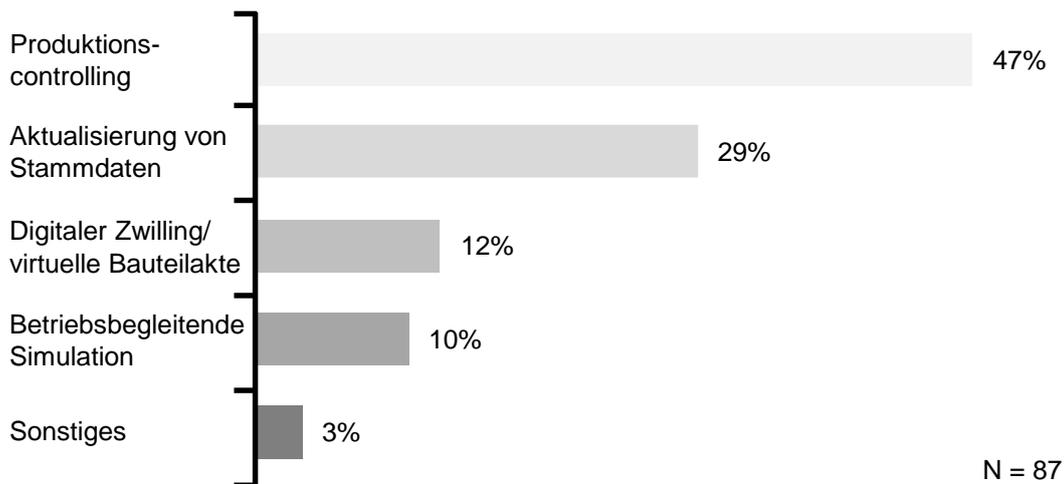


Abbildung 1: Verwendung der erfassten Daten, angelehnt an Lödding et al. (2019)

Der aktuelle Fokus der Datennutzung liegt mit 47 % im Produktionscontrolling, wie etwa der Überwachung von Beständen und von Durchlaufzeiten.

Trotz des hohen bzw. sehr hohen Aufwands für die Datenerhebung werden diese Daten kaum zur Produktionssteuerung genutzt und Potenziale zur Effizienzsteigerung nicht ausgeschöpft. Zudem wird in der Studie herausgearbeitet, dass nur ein Fünftel der Studienteilnehmer die für die Produktionssteuerung erforderlichen Informationen aus den zurückgemeldeten Daten ableitet.

Die aktuelle Situation ist durch einen hohen Anteil manueller Eingriffe in die Fertigung gekennzeichnet. Ihr gegenüber stehen aber immer komplexere Produktionsabläufe und Abhängigkeiten, die manuell kaum erfassbar sind (Hauptvogel 2015; Reinhart et al. 2015). Die Versuche von Unternehmen, der steigenden Dynamik mit dem Einsatz von neuen IT-Systemen zu begegnen, zeigt, dass die Abweichungen der realen Produktionsvorgänge von den Planungen bestehen bleiben (Schuh et al. 2014a).

1 Einleitung

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist ein ganzheitlicher Ansatz erforderlich. Dazu gehören flexible Modellierungsmöglichkeiten, eine schnelle Informationsbereitstellung und die Integration externer Dienstleistungen auf Plattformen zur Datenverarbeitung. Diese Eigenschaften und Bestandteile sind charakteristisch für ein Cyber-physisches Produktionssystem (CPPS), welches ein Forschungsgegenstand im Kontext von Industrie 4.0 darstellt (Monostori et al. 2016; Abele et al. 2016; Reinhart et al. 2015; Lanza et al. 2015). Ein weiterer Aspekt liegt in der Informationsbereitstellung aus Anlagen und Maschinen, mittels z. B. BDE und SPS (Beyerer et al. 2015). Es bedarf einer Harmonisierung hinsichtlich der Rückmeldehäufigkeit und der Daten von Informationen von Fertigungsressourcen (Byrne et al. 1995). Da in Zukunft mit einer steigenden Datenverfügbarkeit zu rechnen ist, sollten Architekturen zur Anwendung kommen, bei denen Plattformen von Zulieferern, Anlagenherstellern und Dienstleistern zur Datenverarbeitung genutzt werden können.

Eine zusätzliche Herausforderung liegt darin, die umfangreichen Informationsmengen der Fertigungsressourcen schnell und reproduzierbar zu analysieren, um geeignete Maßnahmen zu ergreifen. Diese Analysen sollten auf nachvollziehbaren Verfahren basieren, um eine Rückkopplung auf den Prozess sowohl durch einen Experten als auch durch ein Regelsystem zu ermöglichen (Lödding et al. 2019). Durch die Integration automatischer Regelungssysteme in die Produktionssteuerung erhöht sich die Reaktionsgeschwindigkeit. Dies ermöglicht es, bei unerwarteten Ereignissen die Ist-Produktionsabläufe schneller an den neuen Soll-Zustand der Produktion anzunähern.

Die Wettbewerbsfähigkeit produzierender Unternehmen kann durch eine strukturierte Nutzung von Informationen aus der Fertigung weiter erhöht werden, um somit ein CPPS zu erhalten. Zur Umsetzung ist jedoch ein Regelkreis auf Basis von Informationen zwischen den Produktionsanlagen und dem regelnden System erforderlich.

1.2 Zielsetzung

Ausgehend von der Ausgangssituation verfolgt diese Arbeit das übergeordnete Ziel, ein System von Cyber-physischen Produktionssystemen zur Produktionsregelung in fertigen Unternehmen zu entwickeln. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der Verknüpfung von Methoden der Regelungstechnik mit digitalen

Technologien. Durch diese Kombination wird es möglich, die Produktionssteuerung zu einer umfassenderen Produktionsregelung weiterzuentwickeln. Dies ermöglicht es produzierenden Unternehmen, die Folgen unerwarteter Ereignisse mithilfe regelungstechnischer Methoden zu prognostizieren und aktiv zu steuern.

In dieser Arbeit werden vier Forschungsfragen beantwortet, die den Lösungsweg für die Erreichung der Zielsetzung strukturieren. Diese sind:

- Wie kann eine Architektur für die Produktionsregelung von Cyber-physischen Produktionssystemen gestaltet werden?
- Wie können Ereignisse aus Cyber-physischen Produktionssystemen zur Produktionsregelung genutzt werden?
- Wie können Fertigungsressourcen für eine Produktionsregelung modelliert werden?
- Wie kann eine Prognose für die Termintreue aus den Modellen zur Produktionsregelung abgeleitet werden?

Die erste Forschungsfrage beschäftigt sich mit der Entwicklung eines informationstechnischen Referenzmodells, das eine grundlegende Voraussetzung für die Integration von Fertigungsressourcen in ein CPPS darstellt. Dabei werden die Entitäten in der Referenzarchitektur spezifiziert und die Informationsflüsse beschrieben, um sowohl inner- als auch überbetriebliche Kommunikationswege zu erfassen. Das vorgestellte Vorgehensmodell ermöglicht produzierenden Unternehmen die Ableitung einer umfassenden unternehmensweiten Architektur.

Im zweiten Baustein wird nach einem Vorgehen gesucht, wie Ereignisse im Bereich von Fertigungsressourcen verarbeitet werden können. Hierbei werden die Produktionssteuerungsverfahren auf Basis von Lödding (2016) mit Regelkreisen erweitert und die benötigten Soll- und Istwerte spezifiziert. Ein weiterer Bestandteil ist die Einführung von Produktionsereignissen von Arbeitssystemen sowie Hüllkurven zur Beschreibung der zeitlichen Dimension für die Eingriffe in den Fertigungsablauf.

Die dritte Forschungsfrage konzentriert sich auf die Modellierung der Fertigungsressourcen und ihrer logischen Zusammenhänge untereinander. Ein wichtiger Aspekt dieses Bausteins ist die Definition von Modellparametern, die zur Vernetzung der Fertigungsressourcen wie Arbeitssysteme oder Lager- und Transportmittel erforderlich sind. Die Modelle werden in dieser Arbeit mithilfe von regelungstechnischen Methoden entwickelt und detailliert beschrieben.

In der vierten und letzten Frage werden geeignete Prognoseverfahren der Regelungstechnik definiert, die eine spezifische Bewertung der aktuellen Produktionssituation erlauben. In den Prognoseverfahren werden Ereignisse von Produktionsressourcen berücksichtigt, die Einfluss auf die Durchlaufzeit und folglich auf die Termintreue besitzen. Dadurch kann die Produktionsregelung frühzeitig Maßnahmen ergreifen, indem sie sowohl den aktuellen als auch den prognostizierten Zustand des Arbeitssystems kennt.

1.3 Aufbau der Arbeit

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Ausgangssituation und die zugrundeliegende Problemstellung detailliert dargelegt. Die im vorherigen Abschnitt formulierten Forschungsfragen lassen sich gemäß der Wissenschaftssystematik nach Raffée und Abel (1979) der Handlungswissenschaft zuordnen, die Teil der Realwissenschaften ist. Diese Einordnung basiert darauf, dass reale Sachverhalte und existierende Objekte in der Realität behandelt werden und dass die Ergebnisse der Forschung an der Umsetzung in der Praxis scheitern können.

Die Problemstellung, die dieser Arbeit zugrunde liegt, entspringt praxisbezogenen Fragestellungen und ist nicht rein akademischer Natur. Die Entwicklung eines Systems zur Produktionsregelung von Cyber-physischen Produktionssystemen stellt das Hauptziel dieser Forschungsarbeit dar und kann gemäß Ulrich (1982) den angewandten Handlungswissenschaften zugeordnet werden. Jedoch ist es von entscheidender Bedeutung, empirische Realitätsausschnitte zu erläutern, um einzelne Lösungsansätze zu erarbeiten. Dies führt zu einem theoretischen Erkenntnisgewinn im Sinne des heuristischen Forschungsdesigns von Kubicek (1977).

Dieses Forschungsdesign charakterisiert den Forschungsprozess als einen iterativen Lernprozess, bei dem Wissen aus dem Wechselspiel zwischen vorhandenen Erfahrungen und neu gewonnenen Erkenntnissen entsteht (Kubicek 1977). Die bereits vorhandenen Erfahrungen dienen als heuristischer Bezugsrahmen, der sich aus der beruflichen Tätigkeit des Autors als Ingenieur in der Fertigungstechnik sowie als Wissenschaftler ergibt. Insbesondere die erlangten Kenntnisse in den Bereichen Regelungs-, Informations- und Fertigungstechnik bilden zusammen den Bezugsrahmen dieser Forschungsarbeit, wie in Abbildung 2 dargestellt.

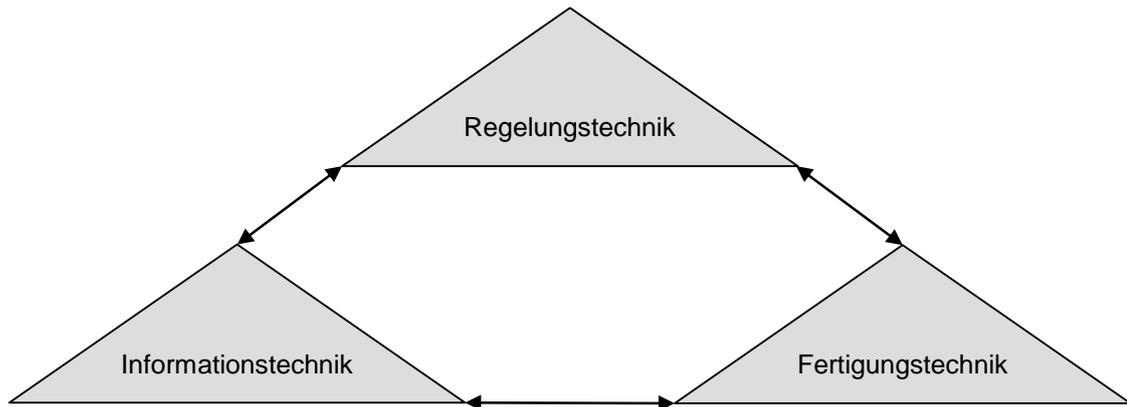


Abbildung 2: Heuristischer Bezugsrahmen der Arbeit

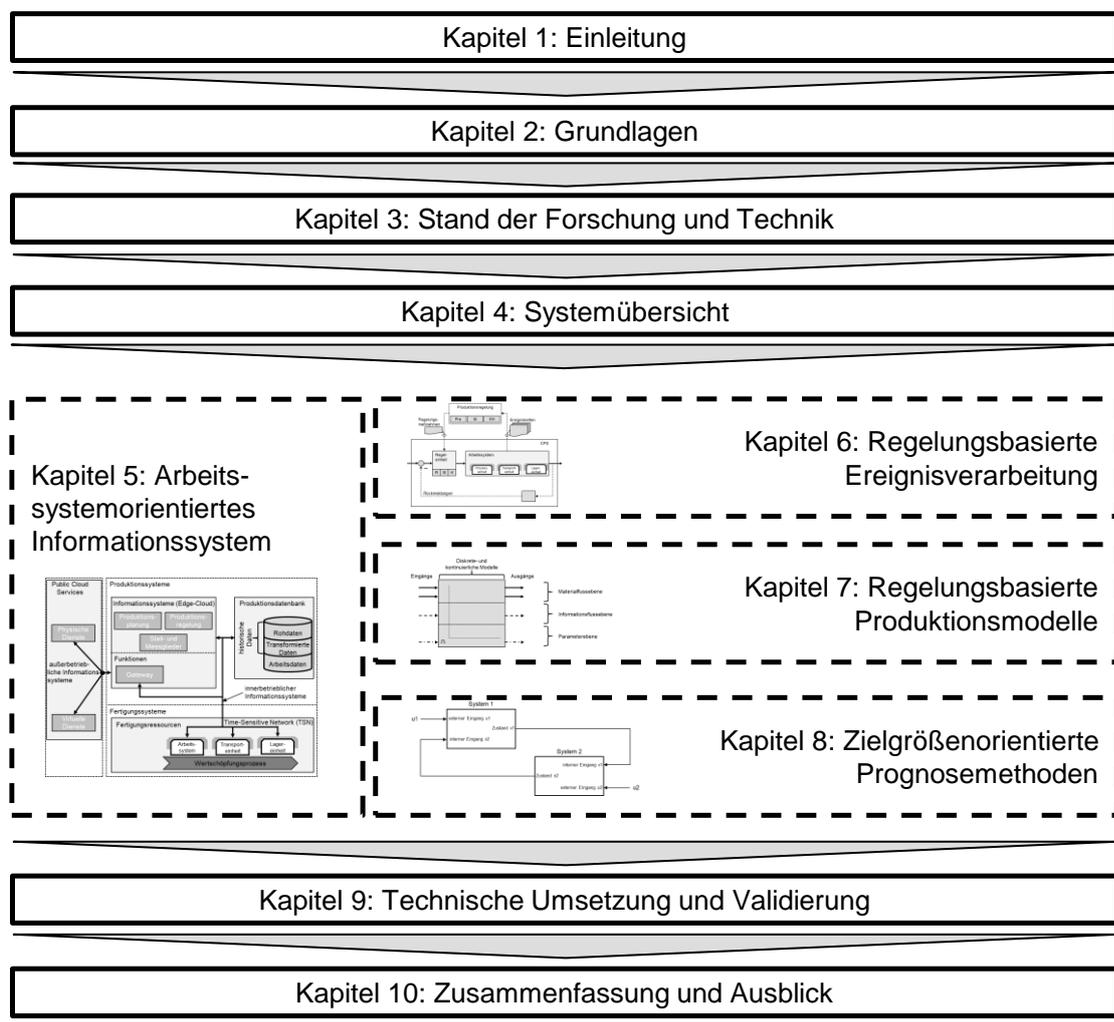
Um den wissenschaftlichen Anforderungen gerecht zu werden, wird der Forschungsprozess gemäß einer strukturgebenden Forschungsmethode durchgeführt. Diese Methode trägt dazu bei, wissenschaftlich valide, konsistente und relevante Forschungsergebnisse zu erzeugen, die nachvollziehbar und überprüfbar sind (vgl. Blessing & Chakrabarti, 2009). Dabei orientiert sich die vorliegende Arbeit an der Design Research Methodology (DRM) von Blessing und Chakrabarti (2009), die vier Phasen umfasst: die *Klärung des Forschungsbedarfs* in Phase 1, die *deskriptive Studienphase 1*, die *präskriptive Studienphase* und die vierte Phase, die *deskriptive Studienphase 2*. Diese Phasen können flexibel kombiniert werden. Entsprechend dem Aufbau der Arbeit werden diese vier Phasen wie folgt zugeordnet.

Zur Umsetzung des vorgestellten wissenschaftlichen Ansatzes gliedert sich die Arbeit, einschließlich Einleitung und Zusammenfassung, in zehn Kapitel (vgl. Abbildung 3). Das erste Kapitel, das die *Klärung des Forschungsbedarfs* darstellt, wird durch das einleitende Kapitel abgedeckt. Kapitel 2 widmet sich der Definition unterschiedlicher Technologien und Konzepte sowie der Beschreibung von Grundlagen im Bereich der Produktionssteuerung, wobei der Schwerpunkt auf den Bereichen Regelungstechnik, Produktionsregelung und Informationsverarbeitung liegt. Die *deskriptive Studie 1* wird im dritten Kapitel behandelt und besteht aus dem themenspezifischen Stand der Forschung und Technik bezüglich des Informationsmanagements sowie der Produktionssteuerung und -regelung vorzustellen. Das Kapitel endet mit der Ausarbeitung der allgemeinen und spezifischen Anforderungen an das System, was Phase 1 abschließt.

Kapitel vier bietet eine Systemübersicht für die Inhalte der folgenden vier Kapitel, die zur Beantwortung der Forschungsfragen dienen. Das fünfte Kapitel beschreibt die Referenzarchitektur und das Vorgehensmodell zur Integration der Produktionsressourcen. Die vorgestellte Informationsarchitektur bildet die Grundlage für

1 Einleitung

die Vernetzung der regelbasierten Ergebnisverarbeitung, die im sechsten Kapitel beschrieben wird. Das siebte Kapitel führt die Ressourcenmodelle für die Arbeitssysteme sowie die Lager- und Transportelemente ein. Kapitel acht stellt die Prognosemethoden auf Basis der Ressourcenmodelle und der mathematischen Modellierung vor. Die Kapitel fünf bis acht entsprechen einer *präskriptiven Studienphase* basierend auf der definierten Zielstellung. Das neunte Kapitel erörtert die Umsetzung der Produktionsregelung am Beispiel einer Brillenglasfertigung und endet mit einer wirtschaftlichen und technischen Bewertung, was der *deskriptiven Studie 2* entspricht. Die Arbeit wird mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick in Kapitel zehn abgeschlossen.



Legende : Kapitel : Hauptkapitel

Abbildung 3: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen

2.1 Übersicht

Aufbauend auf der dargelegten Ausgangssituation und Zielsetzung wird in diesem Kapitel zunächst eine Begriffsdefinition und eine Einführung in die wissenschaftlichen Grundlagen für Produktionsereignisse in der Produktion vorgenommen (vgl. Abschnitt 2.3). Anschließend beschreibt der Abschnitt 2.4 die Grundlagen der PPS sowie der logistischen Zielgrößen und ordnet sie in den Kontext der vorliegenden Arbeit ein. Dabei wird auch die Produktionsregelung im Rahmen der PPS betrachtet. Des Weiteren werden in Abschnitt 2.5 die Grundlagen der Regelungstechnik im Zusammenhang mit den Zielen dieser Arbeit erläutert. In Abschnitt 2.6 erfolgt eine Definition der Begriffe Daten- und Informationsmanagement im Kontext der Produktion.

2.2 Begriffsdefinition

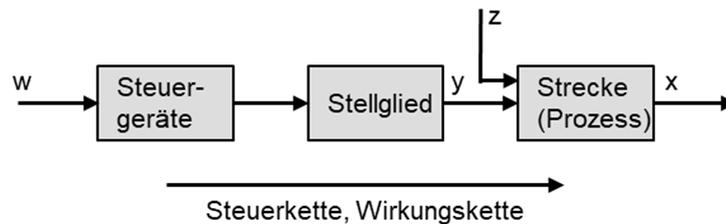
Produktionsregelung

Die Produktionsregelung beschreibt den Wirkungskreislauf (vgl. Abbildung 4, b), bei dem die Produktion von Produkten gesteuert und kontinuierlich durch Rückführung von Informationen überwacht wird. Der allgemeine Sprachgebrauch und die Fachliteratur nutzen für diesen Kreislauf oftmals den Begriff Produktionssteuerung. Dieser Terminus ist gemäß der Definition des VDI (1992), dem Einordnungsschema nach Hackstein (1989) und dem Fertigungsmodell nach Lödning (2016) im klassischen Sinn der Regelungstheorie irreführend (Zapp 2014; Dangelmaier 2009; Kistner und Steven 2001; Kern und Zäpfel 1996; Petermann 1996; Burger 1992). Laut der Definition des Deutschen Instituts für Normung (DIN) ist eine Steuerung ein „Vorgang in einem System, bei dem eine oder mehrere Größen als Eingangsgrößen andere Größen als Ausgangsgrößen aufgrund der dem System eigentümlichen Gesetzmäßigkeiten beeinflussen“ (DIN 60050-351). Der definierte offene Wirkungsfluss der Steuerung widerspricht der Aufgabe einer Überwachung des Produktionsfortschrittes zur Erreichung der logistischen Zielgrößen aufgrund der fehlenden Rückführung der gesteuerten Größe (Dangelmaier 2009) (Abbildung 4, a). Die Regelung ist im Gegensatz dazu ein geschlossenes System und wird von der DIN als ein „Vorgang, bei dem fortlaufend eine Größe, die Regelgröße (die zu regelnde Größe), erfasst, mit einer anderen Größe,

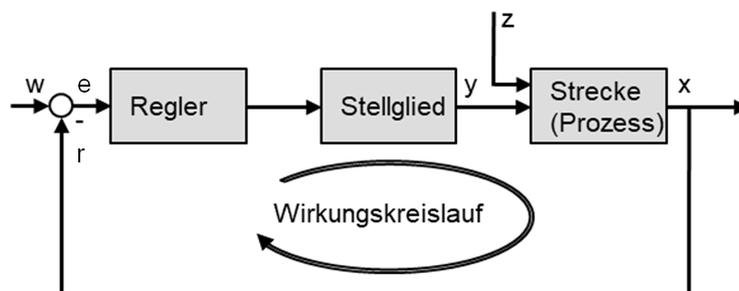
2 Grundlagen

der Führungsgröße, verglichen und im Sinne einer Angleichung an die Führungsgröße beeinflusst wird“ definiert (Lutz und Wendt 2005). Da die Produktionssteuerung auf den Ergebnissen früherer Maßnahmen aufsetzt und auf unerwartete Ereignisse reagiert, ist der Begriff Regelung im Gegensatz zum in der Literatur und Praxis genutzten Begriff Steuerung treffender (Dangelmaier 2009; Breithaupt 2001; Martin 1998).

a) Steuerung



b) Regelung



Legende □ : System → : Informationsfluss x : Regelgröße
w : Führungsgröße e : Regeldifferenz y : Stellgröße
r : Rückführgröße

Abbildung 4: Abgrenzung von Steuerung und Regelung in Anlehnung an Lutz und Wendt (2015)

Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird im weiteren Verlauf der Terminus Produktionsregelung verwendet, welcher die Aufgabe der Produktionssteuerung beinhaltet.

Cyber-physische Systeme

Eines der Basiselemente der vierten industriellen Revolution bilden CPS (Reinhart et al. 2013). Der Terminus CPS wurde erstmals 2006 von Helen Gill im Rahmen einer Konferenz verwendet (Lee und Seshia 2015). Ausgehend von dieser Veröffentlichung haben sich zahlreiche domänenspezifische Begriffsdefinitionen etabliert. Im Folgenden werden relevante Begriffsdefinitionen von CPS diskutiert:

Lee und Lee (2008) definieren CPS in der originalen Veröffentlichung folgenderweise:

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

Broy und Geisberger (2012) bezeichnen CPS in einer Studie der acatech als „[...] Systeme, die durch die hochgradige Vernetzung der physikalischen, sozialen und virtuellen Welt sowie durch die intelligente Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien entstehen.“

Lee und Seshia (2015) spezifizieren diese Definition weiter: „A cyber-physical system (CPS) is an integration of computation with physical processes whose behavior is defined by both cyber and physical parts of the system. Embedded computers [...]“

Die vorgestellten Definitionen und weitere Autoren nennen spezifische Eigenschaften von CPS (Lee und Seshia 2015; Broy 2013; Reinhart et al. 2013; Kagermann und Wahlster 2013; Vogel-Heuser und Roesch 2013; Fischer 2010). Aus der Vielzahl der Definitionen können dabei folgende fünf Charakteristika abgeleitet werden:

- CPS basieren auf softwareintensiven eingebetteten Systemen, die
- mit Hilfe von Sensoren Daten aus der physikalischen Umgebung aufnehmen,
- diese Daten dezentral sowie in Echtzeit verarbeiten und schließlich
- mittels Aktoren autonom auf die physikalische Welt einwirken.
- Die einzelnen CPS stehen dabei drahtlos oder gebunden über digitale, teilweise offene Netze miteinander in Kontakt.

Mit diesen genannten Eigenschaften ergibt sich die Voraussetzung einer globalen Verfügbarkeit der angefallenen Daten.

Die oben genannten Autoren wählen bewusst eine generische Beschreibung der Charakteristika. Es wird weder auf spezielle Lösungsansätze zur Umsetzung noch auf bestimmte Anwendungen eingegangen. Dies verdeutlicht die vielfältigen möglichen Einsatzzwecke von CPS. Mit der Erforschung und Entwicklung von CPS werden vielfältige Ziele verbunden:

- „Systeme haben die Fähigkeit [...] zur Erfassung, Interpretation, Ableitung und Prognose von Störungen, Hindernissen und Risiken.“ (Geisberger und Broy 2012)

- Die systemimmanenten Eigenschaften der intelligenten Datenverarbeitung und der Kommunikationsfähigkeit versetzen die CPS in die Lage zum eigenständigen Informationsaustausch und schließlich zur autonomen, dezentralen und gegenseitigen Steuerung (Kagermann et al. 2013). Die dezentrale Steuerbarkeit und Autonomie der Systeme gepaart mit der Fähigkeit zur Kommunikation mit anderen CPS ermöglicht damit eine generelle Selbstorganisation auf Shopfloor-Ebene und führt zu Synergieeffekten im Hinblick auf Flexibilität und Produktivität. Voraussetzung sind hierfür auf Verhandlungen basierende verteilte Optimierungsalgorithmen. Im Fall von beispielsweise sich ändernden Kundenanforderungen oder auftretenden Störungen besitzt das Produktionssystem eine erhöhte Reaktionsfähigkeit und Proaktivität und erreicht damit erfolgreich die Unternehmensziele (Reinhart et al. 2013; Vogel-Heuser et al. 2013).
- Standardisierte Selbstbeschreibungen und Schnittstellen sollen die Realisierung eines industriellen Plug & Play respektive Plug & Produce von CPS ermöglichen und zu einer schnelleren Anpassung der Produktionsumgebung an neue Produktvarianten führen (Bettenhausen und Kowalewski 2013; Reinhart et al. 2013; Broy und Geisberger 2012).
- Ferner sollen die Produktionseinheiten selbst modular und wandlungsfähig sein, um hinsichtlich veränderter Rahmenbedingungen adaptier- beziehungsweise rekonfigurierbar zu sein (Vogel-Heuser et al. 2013; Westkämper 2009).

Cyber-physische Produktionssysteme

Ein Produktionssystem kann generell als „die Gesamtheit aller zum Produktionsprozess beitragenden Produktionseinheiten [...]“ (Vogel-Heuser et al. 2012) angesehen werden.

Nyhuis et al. (2010) definieren ferner:

„Ein Produktionssystem bezeichnet ein soziotechnisches System, welches Input, wie beispielsweise Know-how, Methoden, Material, Finanzmittel und Energie, in wertschöpfenden und assoziierten Prozessen wie z. B. Transport zu Output transformiert. Die Aufgabe des Produktionssystems ist die Herstellung eines End- oder Zwischenproduktes.“

Wird diese Definition eines Produktionssystems auf das wissenschaftliche Umfeld der CPS übertragen, lässt sich entsprechend Monostori et al. (2016) folgende Definition für CPPS ableiten:

„CPPS consist of autonomous and cooperative elements and subsystems that are connected based on the context within and across all levels of production, from processes through machines up to production and logistics networks.“

Die Vereinigung Bitkom e. V. findet vergleichbare Begriffsbestimmungen, legt allerdings Wert darauf, den Komponenten das Attribut „intelligent“ zuzuschreiben (Bauer et al. 2014):

„Cyber-physical Production Systems (CPPS) consisting of intelligent entities which collaborate and exchange information globally are being proclaimed recently as part of Industrie 4.0.“

In einer Studie der Bitkom zu Industrie 4.0 und Deutschlands volkswirtschaftlichem Potenzial wird eine Analogie zwischen CPPS und sozialen Netzwerken aufgezeigt (Bauer et al. 2014):

„Ein Cyber-physisches Produktionssystem kann auch als ein Netzwerk von Social Machines aufgefasst werden. Analog zu sozialen Netzwerken im Internet, tauschen intelligente, soziale Maschinen untereinander und mit den intelligenten Objekten kontextbezogen und übergreifend Informationen über Aufträge und Zustände aus, um gemeinsam Abläufe und Termine zu koordinieren. Ziel des sozialen Netzwerks aus Maschinen und Objekten ist das Erreichen eines Gesamtoptimums bezüglich Durchlaufzeit, Qualität und Auslastung.“ (Bauer et al. 2014)

Die Autoren Monostori et al. (2016), Vogel-Heuser et al. (2015) und Bauer et al. (2014) betonen in ihren Definitionen von CPPS die horizontale und vertikale Vernetzung der einzelnen Elemente. Diese Vernetzung von Mensch, Maschine und Material, gepaart mit der Intelligenz der CPS, bewirkt eine Abkehr von hierarchischen, zentralen Prozessen hin zu verteilten, dezentralen Steuerungsmechanismen im Produktionssystem und stellt damit einen Aufbruch der klassischen hierarchischen Automatisierungspyramide dar (Monostori 2014; Bettenhausen und Kowalewski 2013).

Ziel ist, dass zukünftig nicht ein übergeordnetes PPS-System Ablaufpläne und Vorgaben erstellt, sondern dass sich die Aufträge selbstverantwortlich um die Verfügbarkeit der benötigten Materialien kümmern, ihre Bearbeitungszeiten bei den verschiedenen CPS buchen und schließlich die termintreue Auslieferung an den Kunden sicherstellen (Bauer et al. 2014).

Basierend auf den bisherigen Erläuterungen wird für diese Ausarbeitung die folgende Definition von CPPS zu Grunde gelegt:

2 Grundlagen

Ein CPPS umfasst die Gesamtheit aller an der Wertschöpfung beteiligten CPS sowie die zur Leistungserbringung erforderlichen Prozesse. Charakteristisch für ein CPPS sind die horizontale und vertikale Vernetzung der intelligenten CPS. Anstelle einer zentralen, hierarchischen Produktionssteuerung organisieren sich die CPS im Netzwerk – mittels Formen der Kommunikation und Kooperation – dezentral und autonom.

Verwaltungsschale

Zur Umsetzung der Potenziale von CPS und CPPS in der industriellen Praxis wurde in einem herstellerunabhängigen Gremium ein generisches Softwaremodell namens „Verwaltungsschale“ entwickelt (Plattform Industrie 4.0 2016). Die Verwaltungsschale ist eine virtuelle Repräsentation von physikalischen oder logischen Entitäten, wie z. B. ein Produkt oder eine Anlage (Adolphs et al. 2016). In diesem Zusammenhang ist eine Entität ein eindeutig identifizierbarer Gegenstand in der Fertigung, der aufgrund seiner Bedeutung in der Informationswelt verwaltet wird (DIN SPEC 91329). Die Verwaltungsschale bildet somit Informationen der Entität über den gesamten Lebenszyklus ab und verfügt über eine standardisierte Schnittstelle. Externe Systeme können darüber die Informationen ohne aufwendige Konfiguration und Programmierung auslesen und interpretieren (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie 2016).

Das Softwaremodell der Verwaltungsschale besteht aus zwei Strukturelementen (vgl. *Abbildung 5*). Grundlegend ist eine Verwaltungsschale in die Abschnitte Header und Body unterteilt.

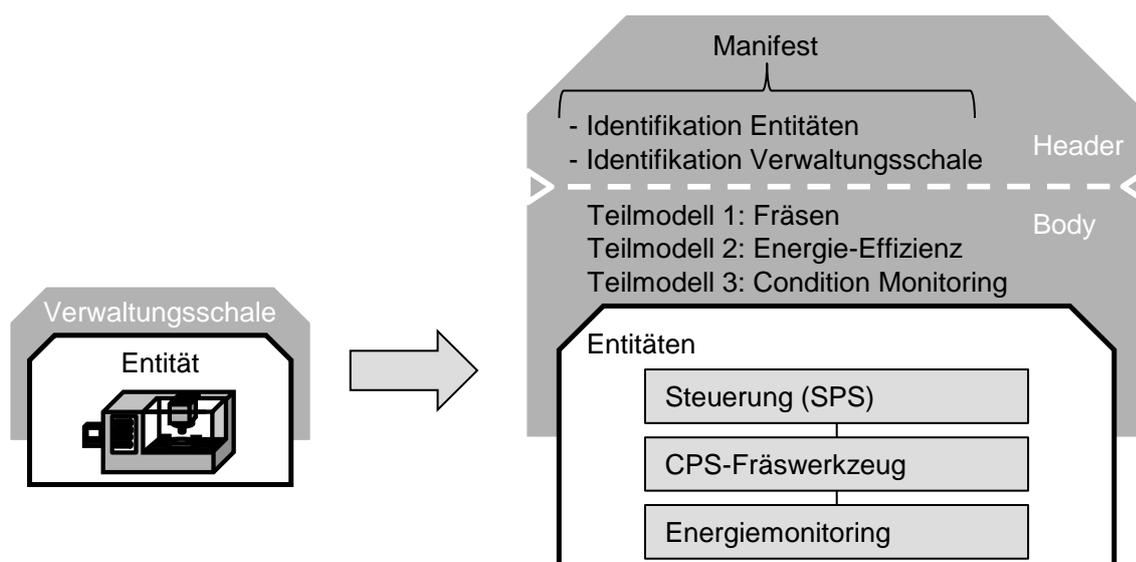


Abbildung 5: Schematische Darstellung der Verwaltungsschale in Anlehnung an DIN SPEC 91345

Der Header ist standardisiert und beinhaltet unter anderem Informationen zur Identifikation der konkreten Entität sowie Informationen zur Verwaltungsschale im Netzwerk selbst. Diese beiden Elemente sind im sogenannten Manifest enthalten und sind verpflichtend (Tantik und Anderl 2018). Die weiteren Inhalte sind aus organisatorischer Sichtweise nötig.

Im *Body* sind die inhaltlichen Teilmodelle der Entität abgelegt. Diese sind nicht direkt abhängig von einem Prozess und sind von generischer Natur. Jedes dieser Teilmodelle verfügt über Merkmale, die auf individuelle Daten und Funktionen der Entität referenzieren. Die Anzahl von Teilmodellen in einem Body ist nicht begrenzt; allerdings ergibt sich aus der Hardware eine Begrenzung. Damit findet im Body eine Verknüpfung der Teilmodelle mit der Entität, wie Sensoren oder der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), statt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, dass eine Verwaltungsschale mehrere Entitäten repräsentiert (DIN SPEC 91345; Heidel et al. 2017).

2.3 Ereignisse in der Produktion

2.3.1 Allgemeines

In der Ausgangssituation wurden Ereignisse von Produktionsressourcen als wichtigstes Werkzeug identifiziert, um den Zustand der Produktion transparent zu machen. Zur Eingrenzung des Begriffes „Ereignis“ wird dieser in einem ersten Schritt aus Sicht der Produktion definiert (vgl. Abschnitt 2.3.2). Im Weiteren stellen sich unterschiedliche Ausprägungen von Ereignissen im Produktionsumfeld (vgl. Abschnitt 2.3.3) dar.

2.3.2 Begriffsdefinition

Allgemein ist unter dem Begriff Ereignis eine Veränderung eines Zustands oder Parameters in einem System zu verstehen (DIN EN 61400-25-3 2014). Oesterle et al. (2010) beschreiben: „Ein Ereignis ist der Auslöser oder das Ergebnis eines Ablaufs“. Luckham und Schulte (2008) definieren Ereignisse genereller: „Ein Ereignis kann alles sein (eine Aktivität, ein Vorgang, eine Entscheidung etc.), was passiert oder von dem erwartet wird, dass es passiert“. Im Hinblick auf einen verketteten Vorgang beschreibt Scheer: „Ein Ereignis kann als Auftreten eines Objekts (z. B. Produkte) oder Änderung einer bestimmten Attributsausprägung definiert

werden" (Scheer 1998). Im Allgemeinen bezieht sich ein Ereignis auf die Veränderung eines Zustands, also typischerweise auf die Änderung des Wertes einer Eigenschaft eines realen oder virtuellen Objekts (Bruns und Dunkel 2010). Diese Definition wird auch in dieser Arbeit verwendet und zusätzlich um die Einteilung in unvorhergesehene, erwartete oder erwartete, aber nicht eingetretene Ereignisse, erweitert.

2.3.3 Ereignisse in der Produktion

In der Literatur finden sich unterschiedliche Ursachen, Auslöser und Typen von Ereignissen in der Produktionsumgebung (Fischäder 2007). Unvorhergesehene Ereignisse bei der Auftragsabwicklung, wie z. B. Eilaufträge, Maschinenausfall oder fehlende Betriebsmittel, wirken sich störend in Form von Unterbrechungen und Verzögerungen auf die Produktionsabläufe aus. Diese unerwarteten Ereignisse werden in der Literatur als „Störungen“ definiert (Schwartz 2004, REFA 1991). Zur Störungsidentifizierung und -kategorisierung finden sich in Publikationen diverse Ansätze. So stellt REFA eine allgemeine Störungskategorisierung auf. Als Störung werden dabei Ursachen einer wesentlichen Soll-Ist-Abweichung betrachtet und nach externen und internen Störungen unterschieden. Die externen Störungen werden durch die Natur, den Staat oder den Markt verursacht. Die Verursacher der internen Störungen befinden sich im Beschaffungs-, Produktions- oder Absatzbereich (REFA 1991). Warnecke (1991b) fokussiert sich bei der Kategorisierung von Störungen auf die Produktion und fügt den internen Störungen noch technische Einrichtungen, Mitarbeiter, Material und Informationen hinzu (Warnecke 1991c). Diese Ursachen lassen sich nochmal in technische und organisatorische Störungen unterteilen (FISCHÄDER 2007). Insgesamt ist festzustellen, dass die einzelnen Kategorisierungen der unvorhergesehenen Ereignisse bzw. Störungen generisch aufgebaut und strukturiert sind. Weiter befinden sie sich auf einer hohen bis abstrakten Aggregationsebene (Gerrit Meyer et al. 2013). Dies rührt aus der großen Anzahl an unterschiedlichen Störungen in der Produktionsumgebung.

2.4 Produktionsplanung und -steuerung

2.4.1 Allgemeines

Die PPS ist ein fester Bestandteil des Managements der Organisation industrieller Unternehmen. Ihr Ziel ist nach Wiendahl (2014), die termin-, mengen- und qualitätsgerechte Produktion von unfertigen und fertigen Produkten unter der optimalen

Nutzung der vorhandenen personellen und technischen Ressourcen trotz auftretender unvorhergesehener Ereignisse, wie Ausschuss oder Kapazitätsausfällen, sicherzustellen. Die zwei Teilgebiete der PPS, die Produktionsplanung und die Produktionssteuerung, werden in dieser Arbeit entsprechend den Definitionen des Vereins Deutscher Ingenieure (VDI) e.V. unterschieden (VDI 1992):

„Die Produktionsplanung ist die systematische Suche und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele.“

„Der Fokus der Produktionssteuerung ist das Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität und Kosten und Arbeitsbedingungen.“

Die definierten Funktionen der PPS sind in einem Schema von Hackstein (1989) in Haupt- und Teilfunktionen weiter gegliedert und in Abbildung 6 dargestellt.

Teilgebiete	Hauptfunktionen	
Produktionsplanung	Produktionsprogrammplanung	Datenverwaltung
	Mengenplanung	
	Termin- und Kapazitätsplanung	
Produktionssteuerung	Auftragsfreigabe	
	Auftragsüberwachung	

Abbildung 6: Teil- und Hauptfunktionen der Produktionsplanung und -steuerung in Anlehnung an Hackstein (1989)

Die Produktionsplanung umfasst die Produktionsprogrammplanung, die Mengenplanung sowie die Termin- und Kapazitätsplanung (vgl. Abschnitt 2.4.4). Das Teilgebiet der Produktionssteuerung enthält die Funktionsgruppen Auftragsfreigabe und Auftragsüberwachung (vgl. Abschnitt 2.4.5). Die Hauptfunktion der Datenverwaltung wird der PPS direkt untergeordnet, da sie als „Servicefunktion“ gleichermaßen zur Verfügung steht. Im Rahmen dieser Funktionen werden die Grunddaten, wie Stammdaten, Arbeitspläne sowie Rüst-, Transport- und Bearbeitungszeiten, gepflegt.

Das Aachener PPS-Modell (Schuh und Stich 2012) ist derzeit das bekannteste Referenzmodell. Es baut auf dem Modell von Hackstein und dem Y-Modell von

2 Grundlagen

Scheer (Scheer 1995) auf und erweitert diese um zusätzliche Querschnittsfunktionen. Eine Möglichkeit zur Differenzierung besteht darin, zwischen Eigenfertigungsplanung und der Fremdbezugsplanung und -steuerung zu unterscheiden. Die letztgenannten Elemente besitzen im Kontext dieser Arbeit eine untergeordnete Rolle.

Um der Vielschichtigkeit der PPS erfolgreich gerecht zu werden, ist ein kontinuierlicher Fluss an Informationen (vgl. Abschnitt 2.6) zwischen den IT-Systemen, die für die Durchführung der Hauptfunktionen zuständig sind, und den technischen Ressourcen bzw. Arbeitssystemen unerlässlich. Ein unterbrechungsfreier Informationsfluss ermöglicht es, die definierten Zielgrößen (vgl. Abschnitt 2.4.2) bei der Auftragsabwicklung bestmöglich zu erreichen.

2.4.2 Logistische Zielsysteme der Produktionsplanung und -steuerung

Die hohe Bedeutung der Produktionsplanung und -steuerung ergibt sich aus der strategischen Wichtigkeit der logistischen Zielgrößen. Wiendahl (2014) ordnet diese Zielgrößen nach ihrem Einfluss der Logistikleistung oder den Logistikkosten zu (Wiendahl 2014). Diese Einordnung ist in Abbildung 7 dargestellt.



Abbildung 7: Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung nach Wiendahl (2014)

Die Logistikleistung ist eine vom Markt wahrgenommene Eigenschaft eines Unternehmens. Diese wird über die Lieferzeit sowie die Liefertreue beurteilt und sollte möglichst hoch sein. Zur Erfüllung dieser Markterwartung ist eine hohe Liefertreue und hohe Termintreue bei der Auftragsabarbeitung erforderlich. Eine kurze Lieferzeit wirkt sich dabei positiv auf die gesamte Logistikleistung aus (Wiendahl 2014). Die Logistikkosten bestehen aus den zwei Komponenten Prozess- und Kapitalbindungskosten. Beide Komponenten sollten aus Sicht des Unternehmens möglichst gering sein. Zur Reduzierung der Kapitalbindungskosten ist es erforderlich, möglichst geringe Bestände an Rohmaterialien, Halbzeugen bzw. Fertigzeugen vorzuhalten. Die Prozesskosten in der Produktion können maßgeblich durch eine hohe Auslastung der Ressourcen positiv beeinflusst werden (Lödding 2016; Nyhuis und Wiendahl 2012).

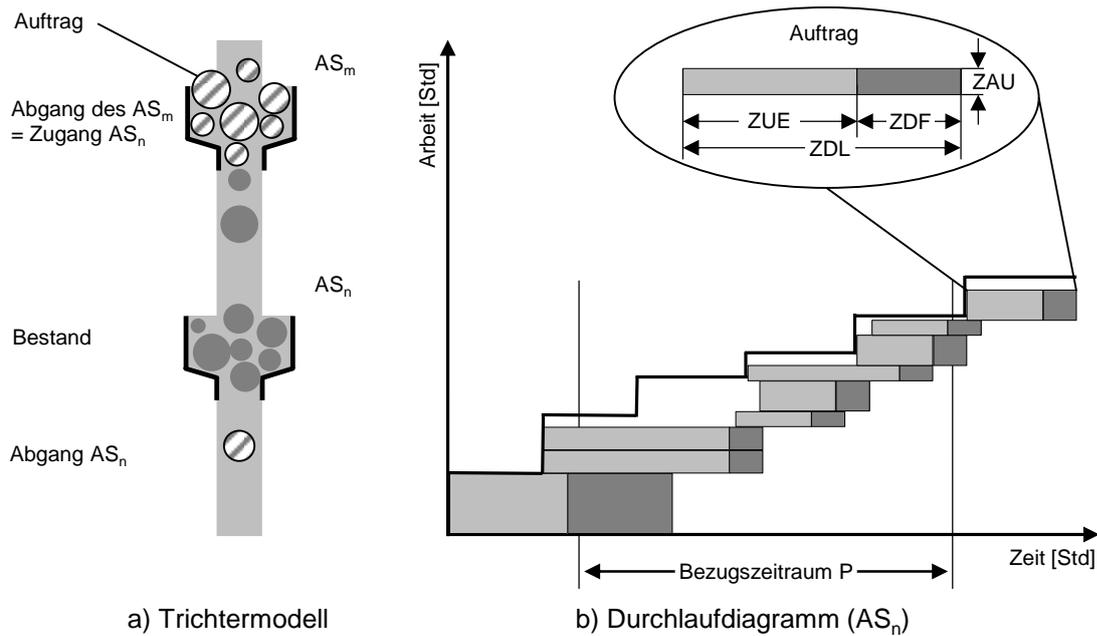
Die vier logistischen Zielgrößen Auslastung, Bestand, Durchlaufzeit und Termintreue der PPS stehen zum Teil in Konkurrenz zueinander. Infolgedessen ist eine Priorisierung und ausgewogene Positionierung innerhalb der Zielgrößen eine zentrale Herausforderung der PPS (Wiendahl 2014; Schuh und Stich 2012).

Zur Bewältigung dieser Herausforderungen ist ein tiefes Verständnis der Wirkzusammenhänge der Zielgrößen notwendig, die im folgenden Abschnitt erläutert werden, um anschließend die Aufgaben der PPS zu detaillieren (vgl. Abschnitt 2.4.5).

2.4.3 Wirkzusammenhänge der Zielgrößen

Zum Verständnis des theoretischen Hintergrunds der logistischen Zielgrößen ist es erforderlich, die Wirkzusammenhänge in Form von Modellen zu erläutern sowie grundlegende Begriffe und Kennwerte zu definieren. Die grundlegenden Modelle zu den logistischen Zielgrößen, nämlich Bestand, Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue, sind im Wesentlichen das Trichtermodell sowie das Durchlaufdiagramm (vgl. Abbildung 8) und die Produktionskennlinien, die in Abbildung 10 dargestellt sind (Wiendahl 2014; Nyhuis und Wiendahl 2012).

2 Grundlagen



Legende AS_n : Arbeitssystem n ZDL : Durchlaufzeit ZAU : Auftragszeit
 ZDF : Durchführungszeit ZUE : Übergangszeit

Abbildung 8: Trichtermodell und Durchlaufdiagramm eines Arbeitssystems in Anlehnung an Nyhuis (2008b)

Bestand

Das Trichtermodell (vgl. Abbildung 8, a) modelliert die Arbeitssysteme einer Produktion nach einem Vorschlag von Bechte (1984) als Trichter. Im übertragenen Sinn werden dem Trichter Aufträge erteilt, die den Bestand am Arbeitssystem repräsentieren. Nach der Bearbeitung verlassen diese Aufträge den Trichter bzw. das Arbeitssystem (AS) wieder. Dabei stellt der Kreisdurchmesser symbolisch die Auftragsmenge dar. Entsprechend stellt die Größe der Trichteröffnung die aktuelle Leistung der betrachteten Einheit, z. B. die Fertigungsressourcen oder das AS, dar. Diese Leistung kann bis zur maximalen Kapazität des betrachteten Elements erhöht werden. Das Durchlaufdiagramm (vgl. Abbildung 8, b) entsteht, indem Zugang und Abgang des Trichters gemessen und mit ihrem Arbeitsinhalt in Vorgabestunden kumuliert über der Zeit aufgetragen werden (Bechte 1984). Befinden sich zu Beginn des Untersuchungszeitraums schon Anfangsbestände von Aufträgen am Arbeitssystem, so beginnt die Zugangskurve vertikal versetzt um den Arbeitsinhalt dieser Aufträge. Dadurch entspricht der vertikale Abstand zwischen der Zugangs- und der Abgangskurve stets dem aktuellen Bestand am Arbeitssystem. Der horizontale Abstand zwischen Zugangs- und Abgangskurve beschreibt die

Reichweite des Arbeitssystems. Diese Kenngröße ist eng mit der Durchlaufzeit verknüpft. Sie sagt aus, wie lange der Bestand ausreicht, um das Arbeitssystem mit Arbeit zu versorgen (Lödding 2016; Wiendahl 2014). Falls die Aufträge im First-in-First-out-Prinzip (FIFO-Prinzip) abgearbeitet werden, entspricht die Kenngröße der Durchlaufzeit eines dem AS zugehenden Auftrages (WIENDAHL 2014).

Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit (*ZDL*) beschreibt mit der variablen Einheit Betrachtungszeitraum (*BKT*) die zeitliche Dauer eines Auftrags an einem Arbeitssystem und ist das kleinste Durchlaufelement. Die *ZDL* für einen Arbeitsvorgang ist als die Zeitspanne definiert, die ein Auftrag von der Beendigung des vorhergehenden Arbeitsvorganges (*TBEV*) des Auftrags bis zum Bearbeitungsende des betrachteten Arbeitsvorganges (*TBE*) selbst benötigt (vgl. Abbildung 9) (Nyhuis und Wiendahl 2012):

$$ZDL = TBE - TBEV \quad (1)$$

mit	<i>ZDL</i>	Durchlaufzeit (Arbeitsvorgang) [<i>BKT</i>]
	<i>TBE</i>	Termin Bearbeitungsende eines Arbeitsvorganges [<i>BKT</i>]
	<i>TBEV</i>	Termin Bearbeitungsende des Vorgänger-Arbeitsvorganges [<i>BKT</i>]

Das Durchlaufelement besteht aus den Zeitanteilen Übergangszeit (*ZUE*) und Durchführungszeit (*ZDF*). Wie in Abbildung 9 zu erkennen, besteht die Durchführungszeit aus Rüst- und Bearbeitungszeiten der einzelnen Aufträge an einem Arbeitssystem. Entsprechend dieser Definition wird die Liegezeit nach der Bearbeitung, ebenso wie die Transport- und Liegezeit vor der Bearbeitung, der Übergangszeit zugeordnet (vgl. Abbildung 9).

2 Grundlagen

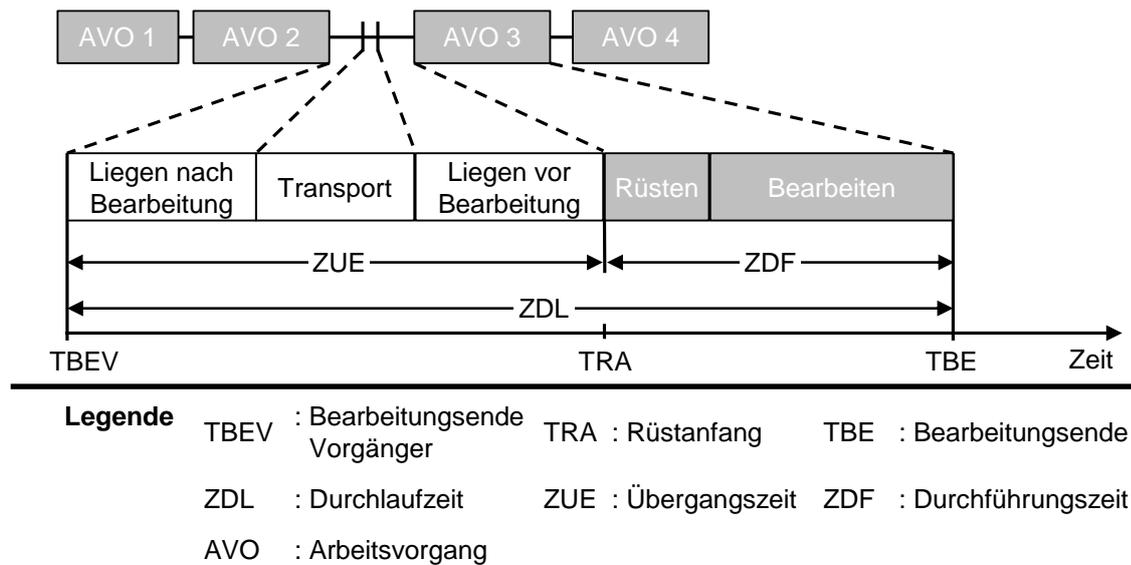


Abbildung 9: Durchlaufzeitanteile und Durchlaufelemente in Anlehnung an Wiendahl (2014)

Eine Möglichkeit zur Bewertung der Durchlaufzeit an einem Arbeitssystem stellt der Flussgrad (FG) dar. Dieser berechnet sich als Quotient aus der Durchlaufzeit (ZDL) und der Durchführungszeit (ZDF) und steigt mit zunehmenden Übergangszeiten an (Wiendahl 2014):

$$FG = \frac{ZDL}{ZDF} \quad (2)$$

mit FG Flussgrad [-]

ZDL Durchlaufzeit (Arbeitsvorgang) [BKT]

ZDF Durchführungszeit [BKT]

Auslastung

Zur Berechnung der Auslastung ist die vollbrachte Leistung eines Arbeitssystems über einen bestimmten Betrachtungszeitraum zu bestimmen. Die Leistung (L) ergibt sich aus dem Verhältnis der geleisteten Arbeitsinhalte in Form von zurückgemeldeten Auftragszeiten (ZAU) und der Dauer des Bezugszeitraumes P . Die resultierende Leistung entspricht der Summe der im Bezugszeitraum zurückgemeldeten bearbeiteten Aufträge. Nach (Nyhuis und Wiendahl 2012) gilt:

$$L = \frac{\sum ZAU}{P} \quad (3)$$

mit	L	Leistung [Std/BKT]
	ZAU	Auftragszeit (in Vorgabestunden) je Arbeitsvorgang [Std]
	P	Länge des Bezugszeitraumes [BKT]

Die Auslastung (A) des Systems wird definiert als das Verhältnis der mittleren Leistung und der möglichen Leistung (Nyhuis und Wiendahl 2012):

$$A = \frac{L_m}{L_{max}} * 100 \quad (4)$$

mit	A	Auslastung [%]
	L_m	Mittlere Leistung [Std/BKT]
	L_{max}	Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]

Die maximale Leistung ergibt sich im Wesentlichen aus der Kapazität des Arbeitssystems. Dabei gilt, dass die obere Leistungsgrenze durch die Kapazitätsfaktoren Betriebsmittel und Personal bestimmt wird (Nyhuis und Wiendahl 2012):

$$L_{max} = \min\{BKAP_v, PKAP_n\} \quad (5)$$

mit	L_{max}	Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
	$BKAP_v$	Verfügbare Betriebsmittelkapazität [Std/BKT]
	$PKAP_n$	Nutzbare Personalkapazität [Std/BKT]

Über die logistisch orientierte Zielgröße der Auslastung hinaus werden in Unternehmen vielfach weitere Kennzahlen, wie z. B. die Overall Equipment Effectiveness (OEE), verwendet, auf die in Abschnitt 2.6.4 eingegangen wird.

Termintreue

Bei den produzierenden Unternehmen in Deutschland ist die Termintreue die priorisierte Zielgröße in der PPS (Piontek 2020a; Lödding 2016; Schuh 2015; Nyhuis 2008a). Die Termintreue ist definiert als das Verhältnis der rechtzeitig fertiggestellten Aufträge zu der Gesamtzahl aller abgeschlossenen Aufträge in einem de-

2 Grundlagen

finierten Betrachtungszeitraum (Dombrowski 1988). Als Grundlage für die Bewertung dient eine festgelegte Termintoleranz, die sich am Plan-Fertigstellungstermin ausrichtet. Als termintreu gelten Aufträge, deren Fertigstellungstermin innerhalb dieser Termintoleranz liegt (Piontek 2020b; Yu 2001). Die Terminabweichung eines einzelnen Auftrags ergibt sich aus der Abweichung des tatsächlichen Auftragsdurchlaufes vom geplanten Auftragsdurchlauf. Die zeitliche Bestimmung der Terminabweichung kann anhand des Auftragszugangs in die Produktion, des Auftragsabgangs oder der Auftragsdurchlaufzeit gemessen werden (Lödding 2016; Wiendahl 2014).

Produktionskennlinien

Ein Unternehmen strebt die Erfüllung aller in Abschnitt 2.4.2 dargestellten Ziele an. Dazu ist es erforderlich, die Konflikte zwischen den Zielgrößen zu verstehen. Die Betrachtung der Wirkungszusammenhänge zwischen den einzelnen logistischen Kenngrößen erfolgt anhand der Produktionskennlinien (vgl. Abbildung 10) (Wiendahl 2014; Nyhuis und Wiendahl 2012; Nyhuis 2008a).

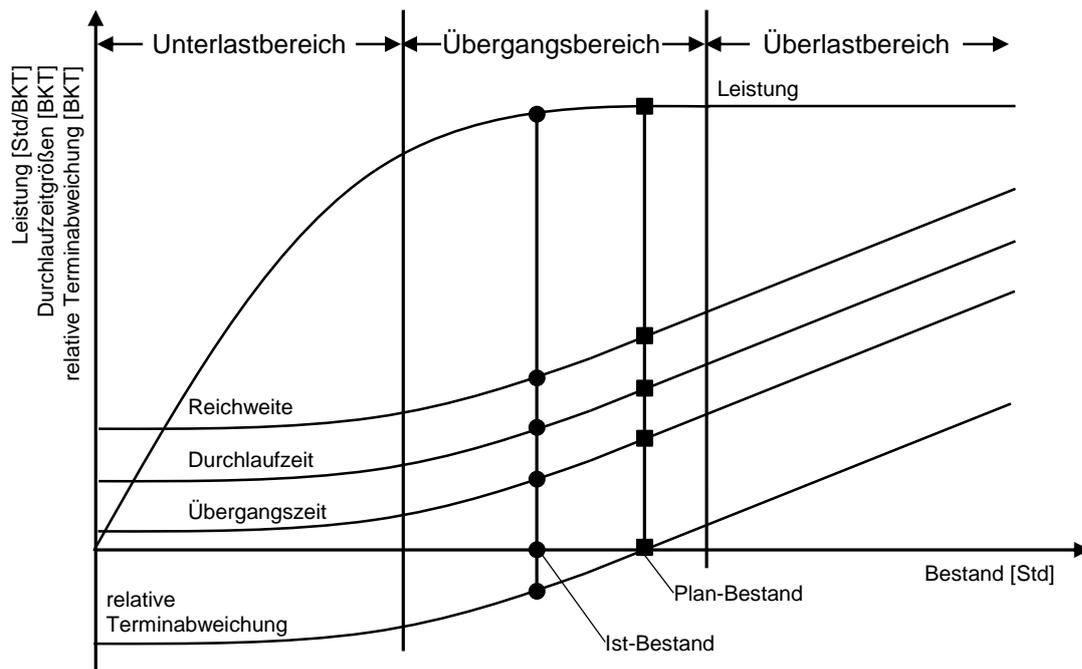


Abbildung 10: Verlauf der Produktionskennlinien für ausgewählte logistische Zielgrößen (Nyhuis und Wiendahl 2012; Yu 2001)

Der prinzipielle Zusammenhang zwischen dem Bestand, der Leistung und der Durchlaufzeit lässt sich in Produktionskennlinien darstellen (Nyhuis 2008a). Diese Kennlinie besagt, dass sich die Leistung eines AS oberhalb eines bestimmten Bestandswertes nur noch unwesentlich verändert. Die ZDL hingegen steigt oberhalb

des Abknickpunktes der Leistung proportional mit dem Bestand an (Lödding 2016; Nyhuis und Wiendahl 2012). Mit dem Trichtermodell, dem Durchlaufdiagramm und den abgeleiteten Kennzahlen werden die drei stationären Betriebszustände Unterlastbereich, Übergangsbereich und Überlastbereich beschrieben (vgl. Abbildung 10). Diese drei unterschiedlichen Betriebszustände lassen sich mit Hilfe der Produktionskennlinien vereinfacht darstellen (Nyhuis 2008a).

Die Ableitung idealer Kennlinien basiert auf einer analytischen Betrachtung von aufgenommenen Produktionsabläufen und daraus abgeleiteten idealen Prozesskennzahlen (Nyhuis 2008a). In der Praxis sind die dafür zugrunde gelegten Voraussetzungen zumeist nicht gegeben (Wiendahl 2008). Insbesondere bei komplexen Produktionsbereichen gibt es eine Reihe von Einflussfaktoren, die eine Abweichung der realen Betriebspunkte von der idealen Kennlinie bewirken (Nyhuis und Wiendahl 2012).

Auf eine vollständige Herleitung der Produktionskennlinien und der Parameter wird an dieser Stelle verzichtet; Detailinformationen sind Nyhuis und Wiendahl (2012) und Nyhuis (2008a) zu entnehmen.

2.4.4 Grundlagen der Produktionsplanung

Die Aufgaben der Produktionsplanung umfassen die Konkretisierung der Kunden- und Vertriebsaufträge in Bezug auf das zukünftige Produktionsprogramm. Diese Aufgaben lassen sich in die vier Hauptfunktionen Produktionsprogrammplanung, Materialbedarfsplanung sowie Termin- und Kapazitätsplanung gliedern (Wiendahl 2014). Im Produktionsprogrammplan wird der primäre Bedarf an Endprodukten nach Art, Menge und Termin für einen vordefinierten Zeitraum festgelegt. Das Ergebnis ist ein Plan, welcher verbindlich die zu produzierende Anzahl und deren zeitliche Reihenfolge festlegt. Dies ist ein rollierender Planungsprozess, der periodisch, z. B. einmal im Monat für einen festgelegten Planungshorizont, erfolgt. Dieser Horizont ist individuell an die Unternehmenssituation bzw. die Produktpalette angepasst und legt den Produktionsplan zwischen sechs und vierundzwanzig Monaten im Voraus fest (Westkämper 2006). Basierend auf dem Produktionsprogrammplan erfolgt die Materialbedarfsplanung, mit der Aufgabe, den Materialbedarf je Erzeugnis zu ermitteln. Der Begriff Material umfasst die Rohstoffe, Hilfsstoffe, Halb- und Fertigfabrikate sowie sogenannte Werkstoffe und Betriebsstoffe. Die wichtigste materialwirtschaftliche Aufgabe ist es, die nötigen Ressourcen zur Leistungserstellung in der richtigen Qualität und Menge, am richtigen Ort und zur richtigen Zeit bereitzustellen (Wiendahl 2014). Daran anschließend erfolgt die

2 Grundlagen

Termin- und Kapazitätsplanung, deren Aufgabe es ist, die eingehenden Fertigungsaufträge zeitlich einer Ressource (Kapazität) zuzuordnen und aufeinander abzustimmen. Mit Hilfe der Durchlaufterminierung wird die grobe Festlegung vorläufiger Start- und Endtermine der einzelnen, für die Herstellung von Zwischen- und Endprodukten notwendigen, Arbeitsvorgänge (AVO) durchgeführt. Basis hierfür sind die geschätzten Plan-Durchlaufzeiten. Neben dem Start- und Endtermin ist die technologische Reihenfolge der Arbeitsvorgänge ein begrenzendes Element bei der Planung. Ergebnis dieser Hauptfunktion sind Planstarttermine, Fertigstellungstermine sowie eine Reihenfolge über die Abarbeitung der Fertigungsaufträge. Häufigste Form der Darstellung sind Gantt-Diagramme, in denen die Arbeitsvorgänge den jeweiligen Produktionsressourcen zugeordnet sind (vgl. Abbildung 11) (Abele et al. 2016; Lödding 2016; Wiendahl 2014; Schuh und Stich 2012; Dangelmaier 2009; Hackstein 1989; Aldinger, L. 1986).

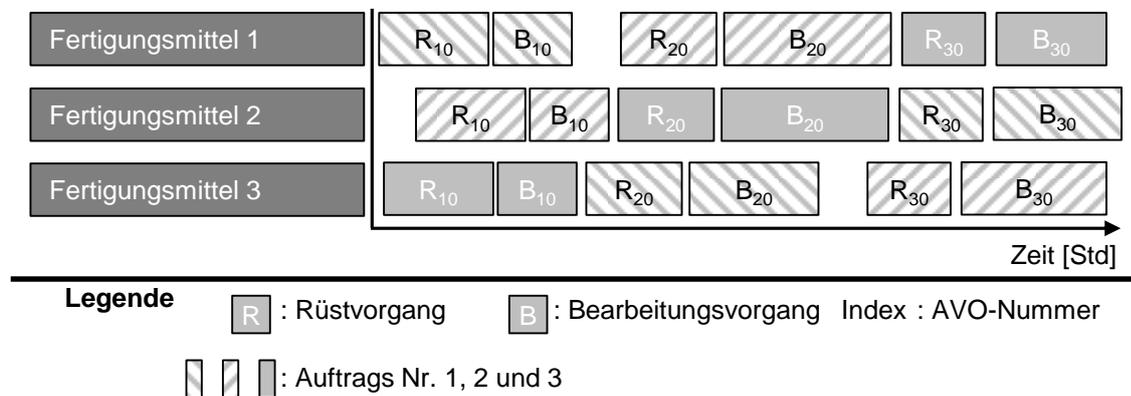


Abbildung 11: Darstellung der terminierten Arbeitsvorgänge in einem Gantt-Diagramm

Hinsichtlich der Zielstellung der vorliegenden Arbeit wurde die Produktionsplanung bezüglich ihrer wesentlichen Aufgaben betrachtet. An dieser Stelle wird beispielsweise auf folgende Literatur verwiesen: Lödding 2016; Wiendahl 2014; Schuh und Stich 2012; Westkämper 2009.

2.4.5 Grundlagen der Produktionssteuerung

Die Schnittstelle zwischen der Produktionsplanung und der Ausführung des Fertigungsauftrages ist die Produktionssteuerung (Kletti und Schumacher 2011). Die Aufgabe der Produktionssteuerung besteht darin, die kurzfristige Umsetzung des Plans für den Fertigungsablauf zu realisieren, um die Übereinstimmung mit den festgelegten Zielen bezüglich Terminen und Mengen sicherzustellen (Dangelmaier

2009). Dies beinhaltet auch die Anpassung des Fertigungsablaufs bei unvorhergesehenen Ereignissen im Verlauf der Produktion. Hierzu führen die beiden Teilfunktionen Auftragsfreigabe und Auftragsüberwachung geeignete Anpassungen des Plans durch. Um die Aufgaben der Teilfunktionen und ihren Einfluss auf die Ziele zu verdeutlichen, wird im Folgenden ein Modell der Fertigungssteuerung nach Lödding (2016) eingeführt.

Dieses verfahrensneutrale Modell, das Abbildung 12 zeigt, beschreibt die Wirkzusammenhänge der Auftragsfreigabe und der Eingriffsmöglichkeiten während der Ausführung eines Auftrages.

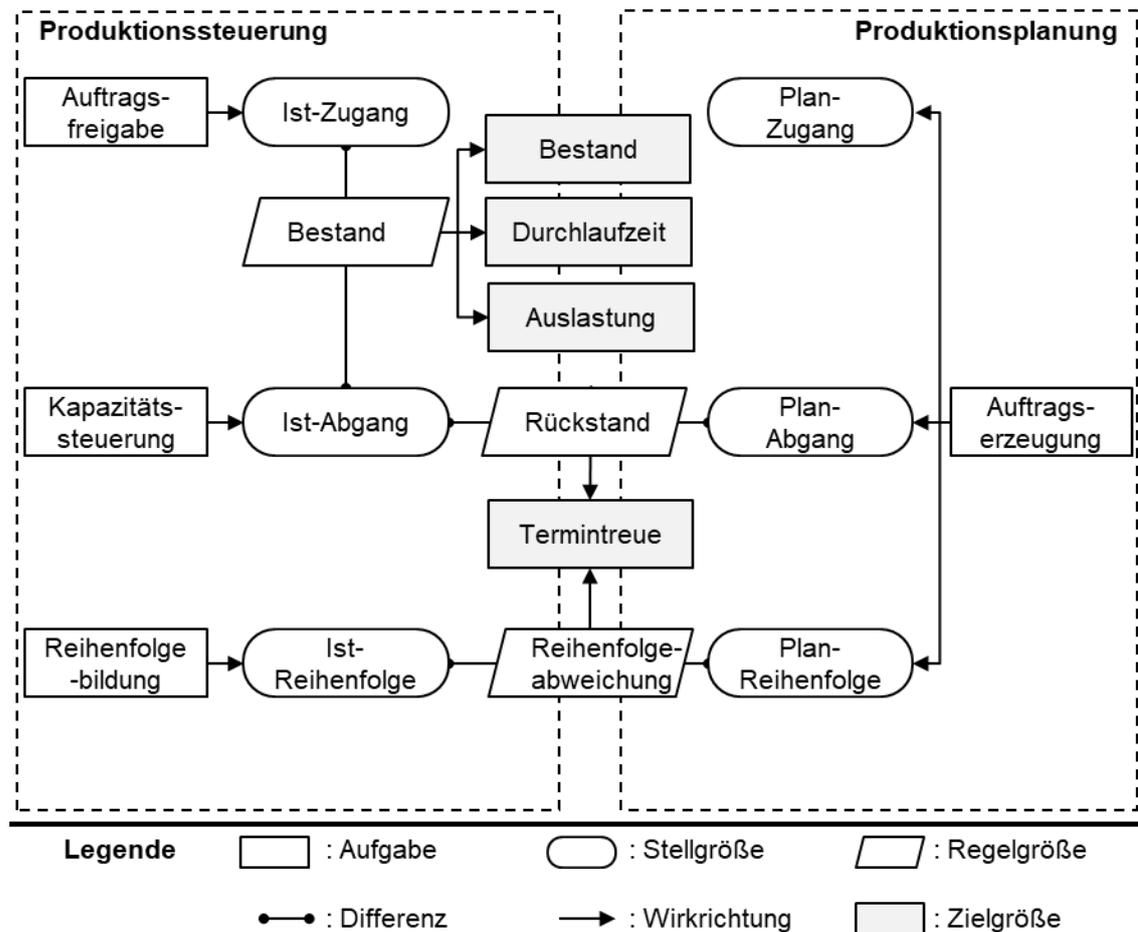


Abbildung 12: Modell der Fertigungssteuerung (Lödding 2016)

Das Modell der Fertigungssteuerung stellt den Zusammenhang zwischen den Aufgaben der Produktionssteuerung, der Produktionsplanung und den logistischen Zielgrößen dar und verknüpft diese über definierte Stell- und Regelgrößen.

2 Grundlagen

Die vier Elemente des Modells der Fertigungssteuerung Abbildung 12 sind durch folgende Wirkzusammenhänge miteinander verknüpft (Lödding 2016):

- Die vier Aufgabenelemente definieren die Stellgrößen des Modells.
- Die drei Regelgrößen resultieren jeweils aus der Abweichung von zwei Stellgrößen.
- Die Regelgrößen des Modells bestimmen die Zielgrößen der Produktionssteuerung.

Im Folgenden werden die wesentlichen Aufgabenelemente Stell-, Ziel- und Regelgrößen des Modells detailliert erläutert.

Aufgaben

Die *Auftragserzeugung* oder Auftragsfreigabe legt den geplanten Zugang und daraus folgend den Abgang der Fertigungsaufträge sowie die Plan-Reihenfolge fest. Die Auftragserzeugung ist damit logischer Bestandteil der Produktionsplanung (vgl. Abschnitt 2.4.4) und bildet die Schnittstelle für die weiteren Aufgaben der Produktionssteuerung (Lödding 2016). Die Produktionssteuerung setzt sich aus der *Auftragsfreigabe*, der *Kapazitätssteuerung* und der *Reihenfolgebildung* zusammen. Bei der Auftragsfreigabe erfolgt die Festlegung der Reihenfolge und der Starttermine, in der die Fertigungsaufträge für die Produktion freigegeben werden. Mit dieser Aufgabe wird die Stellgröße *Ist-Zugang* zur Produktion definiert, welche über die Regelgröße *Umlaufbestand* die logistischen Zielgrößen *Bestand*, *Durchlaufzeit* und *Auslastung* beeinflusst (Lödding 2016). Hierfür stehen unterschiedliche Verfahren, wie z. B. die belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA), zur Verfügung (DANGELMAIER 2009). In der Kapazitätssteuerung werden die tatsächlich eingesetzten Kapazitäten der benötigten Arbeitssysteme mit den terminierten Arbeitsvorgängen festgelegt (Nyhuis 2008a). Der Begriff Kapazität wird nach Nyhuis und Wiendahl (2012) als obere Leistungsgrenze eines Arbeitssystems definiert. Die Kapazität eines Arbeitssystems setzt sich aus den restriktiven Kapazitätsfaktoren Betriebsmittel und Personal zusammen (Nyhuis und Wiendahl 2012), was inhaltlich der Leistung eines Arbeitssystems entspricht (vgl. Abschnitt 2.4.3, Formel 5). In diesem Zusammenhang ist ein AS die kleinste selbstständig arbeitsfähige Einheit, in der jeweils ein einzelner Arbeitsvorgang ausgeführt werden kann, dar (Nyhuis und Wiendahl 2012).

Stellgrößen

Die drei Stellgrößen der Produktionssteuerung sind der *Zugang* und *Abgang* der Produktion sowie die *Reihenfolge*, in der die Fertigungsaufträge abgearbeitet werden (Lödding 2016). Das Modell der Fertigungssteuerung enthält sowohl die von der Produktionssteuerung bestimmten Ist-Werte als auch die festgelegten Planwerte der Produktionsplanung. Der Zugang beschreibt die benötigte Kapazität, die der Produktion in Form von Aufträgen mit einer bestimmten Vorgabezeit zugeht. Diese Stellgröße kann durch den Betrag und den Zeitpunkt des Zugangs charakterisiert werden. Darüber hinaus beinhaltet sie die Reihenfolge, in der die Aufträge der Fertigung zugehen (Lödding 2016). Der Ist-Zugang wird im Wesentlichen durch die Aufgabe der Auftragsfreigabe bestimmt. Der Ist-Abgang wird in Analogie zum Zugang durch den Betrag und den Zeitpunkt der Kapazität beschrieben, der von einer Fertigung abgearbeitet wird. Er wird hauptsächlich von der verfügbaren Kapazität der Arbeitssysteme beeinflusst und ist damit maßgeblich von der Kapazitätssteuerung beeinflusst (Nyhuis 2008a). Als eigenständige Stellgröße ist die *Reihenfolge* definiert, in der die Arbeitssysteme der Produktion die Aufträge abarbeiten.

Regelgrößen

Die Basis der Auftragsüberwachung einer Produktionssteuerung sind die Rückmeldungen von den Arbeitssystemen über den Fertigungsfortschritt (Wiendahl 2014). Diese Rückmeldungen zeigen Abweichungen in den Stellgrößen und resultieren in den drei Regelgrößen *Umlaufbestand*, *Rückstand* und *Reihenfolgeabweichung* des Modells. Der *Umlaufbestand* ergibt sich aus dem zeitlich kumulierten Ist-Zugang und Ist-Abgang der Aufträge an einem Arbeitssysteme in der Produktion. Diese Regelgröße beeinflusst die logistischen Zielgrößen der Kapitalbindungskosten der Produktion (vgl. Abschnitt 2.4.2) (Lödding 2016). Der *Rückstand* einer Produktion ist das zeitlich kumulierte Ergebnis aus Ist-Abgang und Plan-Abgang. Er beeinflusst zusammen mit der *Reihenfolgeabweichung* die Zielgröße Termintreue. Die Reihenfolgeabweichung dokumentiert die Abweichung der vorliegenden von der geplanten Reihenfolge (Lödding 2016).

Zielgrößen

Die Regelgrößen des Modells führen zu den vier fundamentalen Zielgrößen *Bestand*, *Durchlaufzeit*, *Auslastung* und *Termintreue* in der Produktion (vgl. Abschnitt 2.4.2) (Lödding 2016; Wiendahl 2014). Das Modell beschreibt somit, wie

2 Grundlagen

die Aufgaben und Stellgrößen der Produktionsteuerung und die Produktionsplanung die internen logistischen Zielgrößen beeinflussen.

Das Modell nach LÖDDING (2016) zeigt die unterschiedlichen Aufgaben und Einflussmöglichkeiten zwischen der Produktionsplanung und Produktionssteuerung auf, was die Bedeutung der Produktionssteuerung verdeutlicht (Wiendahl 2014).

2.5 Grundlagen der Regelungstechnik

2.5.1 Allgemeines

Die Regelungstechnik befasst sich mit der gezielten Beeinflussung von dynamischen Systemen durch das Prinzip der Rückkopplung. Wesentliches Kennzeichen ist dabei der geschlossene Wirkungskreislauf, bei der die Regelgröße im Wirkungsweg des Regelkreises fortlaufend sich selbst beeinflusst (Föllinger 2016). Im Folgenden wird der Wirkungskreislauf eines Regelkreises kurz erläutert und in Abbildung 13 dargestellt.

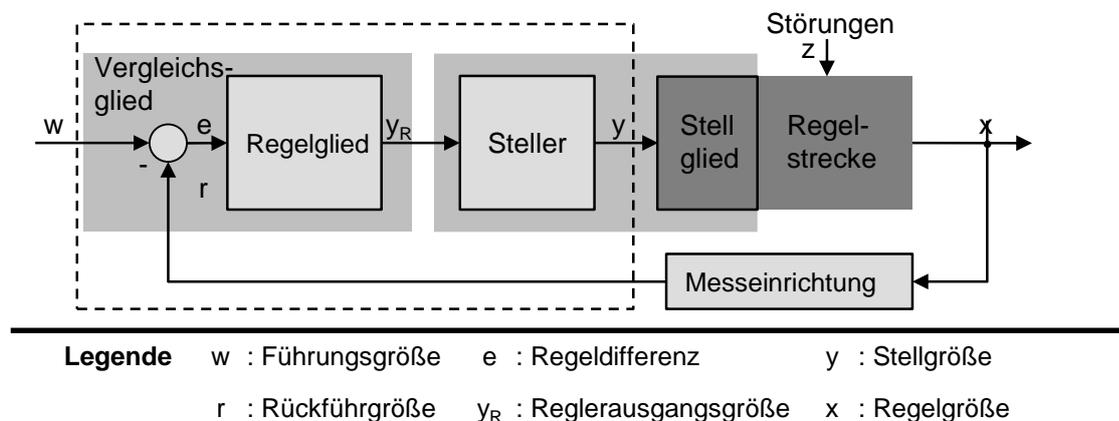


Abbildung 13: Wirkungsplan einer Regelung in Anlehnung an Lutz und Wendt (2015)

Die Regelstrecke ist der Teil eines technischen Systems, der beeinflusst werden soll. Die Eingangsgröße des Regelkreises wird als Stellgröße y bezeichnet, während die zu regelnde Strecke als Regelgröße x bezeichnet wird. Die Regelgröße x (Ist-Wert) wird am Messort mit einer Messeinrichtung erfasst und mit der Führungsgröße w (Soll-Wert) durch Differenzbildung verglichen. Die Führungsgröße w wird von außen vorgegeben, um die Regelung zu steuern. Die Differenz zwischen der Rückführgröße r und der Regelgröße wird als Regeldifferenz e bezeichnet. Auftretende Störungen im Regelkreis werden mit z bezeichnet. Diese

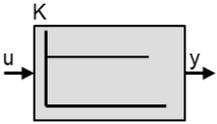
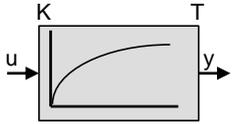
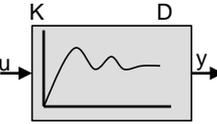
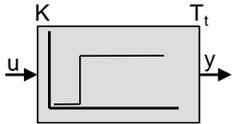
greifen an den Störorten an und beeinflussen die Regelgröße x . Die Regeldifferenz e dient als Eingangsgröße des Regelglieds. Sie wird verstärkt und an die Stellrichtung weitergegeben. Die Ausgangsgröße der Stellgröße y wirkt am Stellort auf die Regelstrecke. (Lunze 2014; Unbehauen 2008; Lutz und Wendt 2005)

Der folgende Abschnitt führt die wichtigsten Standardelemente der Regelstrecke, der Modellierung und der Methoden zur Bewertung des Regelkreises detailliert auf.

2.5.2 Modellierung von Regelstrecken

Durch die Kombination von Übertragungsfunktionen lassen sich technische Systeme modellieren. Für Regelstrecken werden verschiedene Übertragungsfunktionen zur Modellbildung genutzt, die sich nach deren grundlegenden Eigenschaften einteilen lassen. Folgend werden ausgewählte lineare Übertragungsfunktionen (vgl. Tabelle 1) mit der größten Relevanz für technische Arbeitssysteme erläutert (Föllinger 2016).

Tabelle 1: Zusammenstellung von Übertragungsfunktionen (Föllinger 2016)

P-Glied	PT1-Glied	PT2-Glied	PT-Glied
			
$G(s) = K$	$G(s) = \frac{K}{1 + T s}$	$G(s) = \frac{K}{1 + 2DTs + Ts^2}$	$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = e^{-sT_t}$

mit	$G(s)$	Übertragungsfunktion [-]
	K	Verstärkung [-]
	T	Zeitkonstante [-]
	T_T	Totzeit [s]
	s	Spektralfunktion (Bildbereich) [-]
	D	Dämpfung [-]
	u	Eingangssignal [-]
	y	Ausgangssignal [-]

Proportionales-Glied (P-Glied)

Bei einem P-Glied wird das Eingangssignal verzögert zum Ausgang übertragen. Bei allen technischen Systemen ist dies eine Näherung, da immer Verzögerungen auftreten, die bei der Verwendung von P-Gliedern vernachlässigbar sind (Lunze 2014).

Proportionales-Glied mit Verzögerung I. Ordnung (PT1- Glied)

PT1-Glieder treten bei verschiedenartigsten technischen Anwendungen, wie z.B. einem Feder-Dämpfer-System, auf. Dieses System stellt beispielsweise einen Speicher dar. Darüber hinaus ist der zeitliche Verlauf stets reproduzierbar und abhängig von den Parametern K und der Zeitkonstante T (Föllinger 2016).

Proportionales-Glied mit Verzögerung II. Ordnung (PT2-Glied)

Ein PT2-Glied ist vom gleichen Typ wie ein PT1-Glied, wird aber durch eine weitere Zeitkonstante T und eine dimensionslose Zahl D , die Dämpfung, erweitert. Abhängig von der Dämpfung D ändert sich die Eigenschaft dieser Funktion stark. Die Zeitkonstante T hingegen ist für diese Einstufung unerheblich. Die Diskussion der Eigenschaften eines PT2-Glieds muss deshalb in Abhängigkeit von der Dämpfungskonstante D geführt werden (Unbehauen 2008). Die unterschiedlichen Eigenschaften werden als aperiodischer Fall, aperiodischer Grenzfall oder periodischer Fall bezeichnet. Im periodischen Fall ist das System schwingungsfähig bzw. nicht stabil und übertrifft den Endwert K . In den anderen Fällen ist das System stabil (Lunze 2014).

Totzeit-Glied (PT-Glied)

Die kennzeichnende Eigenschaft eines PT-Glieds besteht darin, dass die Ausgangsgröße nach einer Änderung der Eingangsgröße während der Totzeit zunächst ihren Wert behält. Beispielsweise tritt dieser Effekt beim Transport von Wärme und von Materialien auf (Föllinger 2016).

2.5.3 Erweiterung des Regelungsmodells

Die bisherigen Erläuterungen wurden am Beispiel eines einfachen Regelkreises durchgeführt (vgl. Abbildung 13). Ein solcher Regelkreis zeichnet sich dadurch aus, dass ein Regelglied, ein Steller, eine Regelstrecke und eine Messgröße vorhanden sind. Eine wesentliche Vereinfachung des Regelkreisentwurfs wird üblicherweise durch den Einsatz einer Kaskadenregelung erreicht (Schröder 2015). Sie

bezeichnet den Aufbau von untergeordneten Regelkreisen, wie in Abbildung 14 zu sehen ist.

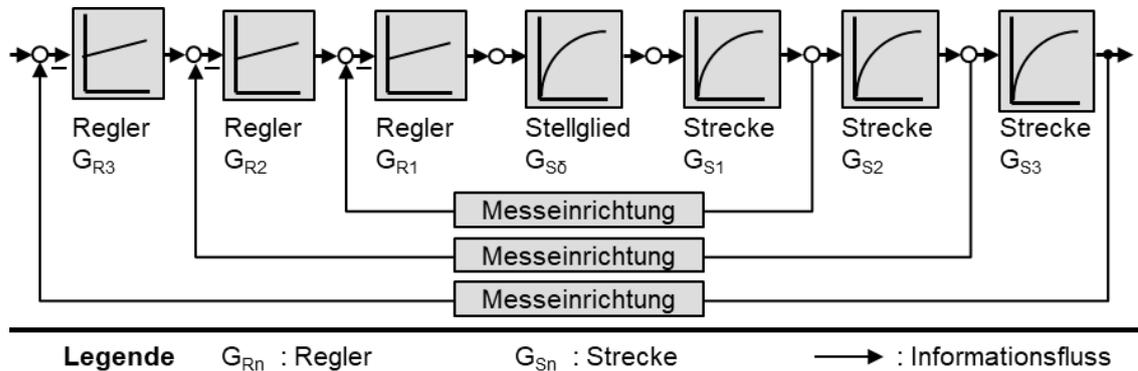


Abbildung 14: Kaskadenregelung in Anlehnung an Lutz und Wendt (2015)

Mit der Kaskadierung gehen Vorteile, wie z. B. die schnellere Ausregelung von Störungen und die Möglichkeit, komplexe Regelstrecken zu unterteilen, einher (Schröder 2015; Lutz und Wendt 2005). Voraussetzung dafür ist, dass der unterlagerte bzw. innere Regelkreis schneller als der überlagerte Regelkreis reagiert (Unbehauen 2008).

Eine weitere Eigenschaft bei einer Kaskadierung eines Regelkreises ist die Zunahme von Messeinrichtungen. Für jede Regelschleife bedarf es einer Rückführung der Regelgröße über eine Messeinrichtung. Misst die Einrichtung zu vorgegebenen Zeitpunkten, wird von einem Abtastvorgang gesprochen. Somit entsteht in einem kontinuierlichen Prozess eine zeitdiskrete Rückmeldung. Zur Berechnung der minimalen Anzahl der Abtastvorgänge wird das sogenannte Nyquist-Shannon-Theorem herangezogen (Unbehauen 2008). Es besagt, dass die Abtastfrequenz f_T mindestens doppelt so groß sein muss wie die höchste im abgetasteten Signal vorkommende Störfrequenz f_{smax} (vgl. Formel (6)). Um eine möglichst schnelle Störungsunterdrückung zu erreichen, sollte die Abtastfrequenz idealerweise im Bereich des 6- bis 20-fachen Werts liegen (Lunze 2014).

$$f_T > 2 f_{smax} \quad (6)$$

2.5.4 Bewertung eines Regelkreises

Die Auslegung eines Regelkreises erfolgt anhand von Kriterien wie der Stabilität des Regelkreises, der Unterdrückung unerwünschter Störeinflüsse sowie dem Führungsverhalten bei gewünschten Bewegungsvorgaben (Janschek 2010). Für die Bewertung dieser Aufgaben stehen in der Regelungstechnik unterschiedliche Methoden zur Verfügung. Der folgende Abschnitt stellt ausgewählte Methoden vor, die für die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit relevant sind.

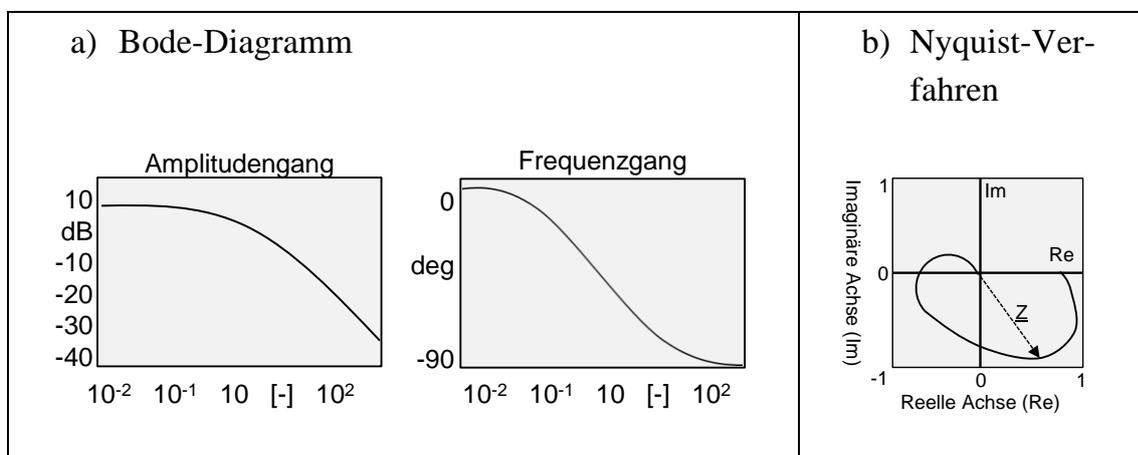
Bode-Diagramm

Das Bode-Diagramm (vgl. Tabelle 2, a) dient der Darstellung des zeitlichen Verhaltens eines dynamischen Systems, wie sie in Abschnitt 2.5.2 beschrieben wurden. Durch die logarithmische Skalierung haben Bode-Diagramme den Vorteil, dass komplexe Reihenschaltungen von Übertragungsgliedern veranschaulicht und analysiert werden können (Lutz und Wendt 2005).

Nyquist-Verfahren

Das Nyquist-Verfahren ist speziell für regelungstechnische Problemstellungen geeignet. Es ermöglicht eine Aussage über die Stabilität des geschlossenen Regelkreises. Mit diesem Verfahren können auch Aussagen über die Stabilität der einzelnen Regelkreisglieder in Regelkreisen mit mehreren Regelgliedern ermittelt werden. Darüber hinaus ist dies auch möglich, wenn der Regelkreis Totzeiten enthält (Janschek 2010). Die Darstellung der Berechnung erfolgt mittels Ortskurven (vgl. Tabelle 2, b)

*Tabelle 2: Darstellungsformen von Verfahren zur Bewertung von Regelkreisen
Bildquellen nach Lutz und Wendt (2005)*



2.6 Daten- und Informationsmanagement

2.6.1 Allgemeines

Ein effizientes Daten- und Informationsmanagement in Form einer teilbereichsübergreifenden Datenverarbeitung (vgl. Abbildung 6) ist die Grundlage aller Aufgaben der PPS (Schuh und Stich 2012; Warnecke 1991a). Zur Erfüllung dieser Aufgaben bedarf es Daten, Informationen, eines Informationsflusses und eines Informationsmanagements. Zur Sicherstellung eines einheitlichen Verständnisses werden diese Begriffe definiert und abgegrenzt.

Der Begriff Daten wurde in ISO/IEC 2382 (ehemals DIN 44300) von Zeichen und Informationen abgegrenzt. Daten werden darin als „Gebilde aus Zeichen oder kontinuierlichen Funktionen, die aufgrund bekannter oder unterstellter Abmachungen Informationen darstellen, vorrangig zum Zweck der Verarbeitung oder als deren Ergebnis“ definiert (ISO/IEC 2382). Der Übergang zwischen Zeichen und Daten wird durch eine Syntax ermöglicht (Piller 2006). Werden die Zeichen mit einer regelbasierten Syntax in Zusammenhang gebracht, wird von der Generierung von Daten gesprochen. Die Anreicherung der Daten mit einem zusätzlichen Kontext in Form einer Semantik verleiht den Daten eine Bedeutung, so dass eine Information entsteht (Gutounig 2015). Im produktionstechnischen Verständnis sind Informationen somit Nachrichten über organisatorische und technische Ereignisse (vgl. Abschnitt 2.3) (Bruns und Dunkel 2010).

Die Aufgaben des Informationsflusses liegen nach Krcmar (2016) in der Erfassung, der Verarbeitung, dem Transport und der Speicherung von technischen und/oder organisatorischen Informationen. Bei der Gestaltung der Informationsflüsse in betrieblichen Umgebungen kann der Informationsfluss vom Materialfluss entkoppelt oder mit diesem synchronisiert sein (Krcmar 2016). Eine ausschlaggebende Randbedingung ist dabei die Berücksichtigung der Echtzeitanforderungen der PPS und Arbeitssysteme. Systeme zur Unterstützung des Produktionsbetriebs werden als produktionsnahe IT bezeichnet (Kletti 2007).

Das Informationsmanagement umfasst die Aufgaben der Planung, Steuerung und Kontrolle der Informationsflüsse (Krcmar 2016). Nach Krcmar (2016) ist ein Informationsmanager verantwortlich für die effiziente, effektive und ökonomische Behandlung aller Informationen und Informationswerkzeuge der Organisation. Eine der wesentlichen Aufgaben des Informationsmanagements ist es demnach, die erforderlichen Informationen zur richtigen Zeit und im richtigen Format zum

2 Grundlagen

Entscheider zu bringen (Heinrich und Burgholzer 1988). Dem Informationsmanagement kommt aufgrund des zunehmenden Informationsangebotes (vgl. Abschnitt 1.1) und des gestiegenen Informationsbedarfs zur Beherrschung der dynamischen betrieblichen Prozesse eine steigende Bedeutung zu. Unter Berücksichtigung des Ziels der Produktionsregelung ist ein effektives Informationsmanagement unabdingbar (Krcmar 2016; Kletti und Schumacher 2011).

Die Gesamtheit der Teilsysteme, von der Generierung eines einzelnen Zeichens bis hin zum Informationsmanagement, bildet ein Informationssystem. Informationssysteme sind soziotechnische Systeme, die sowohl menschliche als auch maschinelle Komponenten umfassen (Krcmar 2016).

2.6.2 Informationssysteme in der Produktion

Die Managementfunktion und deren Aufgaben im Produktionsumfeld lassen sich nach der VDI 5600 in drei Ebenen einordnen, wie die folgende Abbildung 15 darstellt.

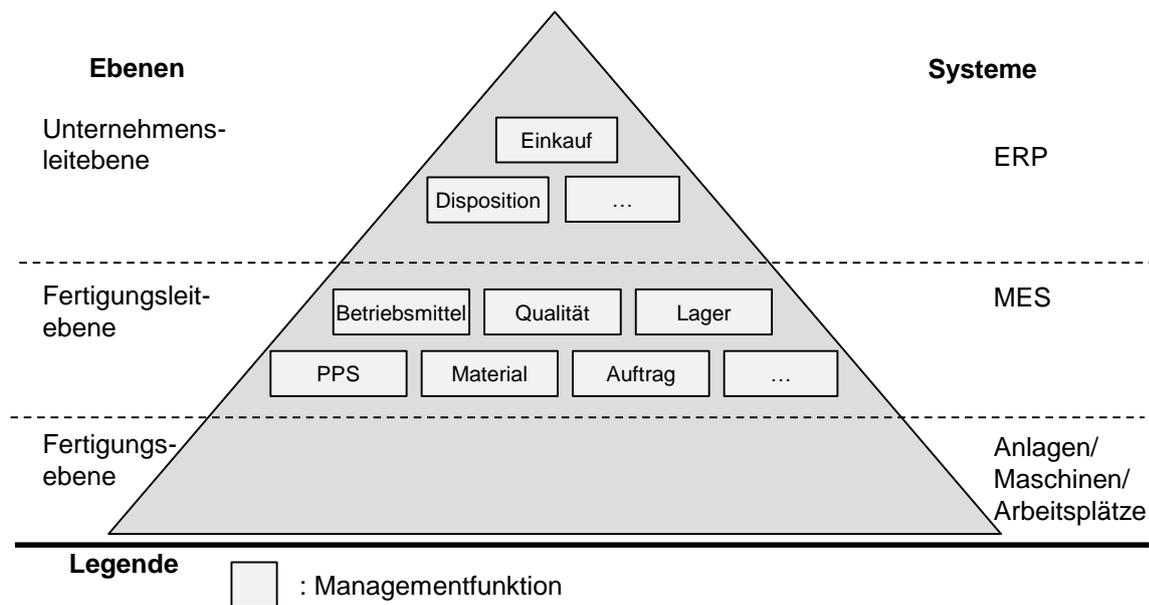


Abbildung 15: Einordnung von Funktionen in den Leitebenen eines Unternehmens VDI 5600

Die Systeme des Enterprise-Resource-Planning (ERP) sind der Unternehmensleitenebene zuzuordnen. Von dieser Ebene aus erfolgt die optimale Allokation der Kapazitäten von Arbeitssystemen für eine effiziente betriebliche Wertschöpfung. Es werden Informationen horizontal in das gesamte Unternehmen integriert. ERP-Systeme beinhalten je nach spezifischer Anwendung zahlreiche Funktionen, wie

z. B. Einkauf und Disposition (Kletti 2007). Der Informationsfluss auf der Fertigungsebene wird mittels Manufacturing-Execution-Systeme (ME-System) vollzogen. Die VDI 5600 definiert unter dem Begriff ME-System zehn Subsysteme mit jeweils zugeordneten Aufgaben für den kurzfristigen Eingriff in die Produktion. Auf der Fertigungsleitebene befinden sich Systeme, wie z. B. das Qualitätsmanagement und die Verarbeitung von Betriebs- und Maschinendaten aus der Fertigungsebene (Kletti 2007). Die Grundlagen der Datenerfassung von realen Prozessereignissen werden im folgenden Abschnitt gesondert dargestellt.

2.6.3 Datenerfassung

Zur Erreichung der logistischen Zielgrößen sind Rückmeldungen aus der Produktion notwendig (Kletti und Schumacher 2011). Für die Datenerfassung im Produktionsumfeld können grundlegend die Bereiche Maschinendatenerfassung (MDE) und Betriebsdatenerfassung (BDE) unterschieden werden (Schuh und Stich 2012). Die BDE umfasst die manuelle Aufnahme von organisatorischen und technischen Daten aus der Fertigungsebene, wie Rüst- und Bearbeitungszeiten oder die Rückmeldung von Mengen und Maschinenstörungen. Der aktuelle Status von Maschinen und Anlagen wird von der MDE aufgenommen (Schuh und Stich 2012). Die Rückmeldehäufigkeit und Genauigkeit der Daten sind bei MDE-Systemen höher als bei manuellen Rückmeldungen in BDE-Systemen. Gleichzeitig erhöht sich jedoch auch der Aufwand, der für die Installation einer entsprechenden Datenerfassung und -auswertung notwendig ist (Lotter und Wiendahl 2012).

2.6.4 Bewertung der logistischen Zielgrößen anhand der Betriebsdaten

Die Bewertung der logistischen Zielgrößen erfolgt in der Praxis mittels prozess- und auftragsbezogener Kennzahlen (Schuh und Stich 2012). Kennzahlen bilden die Abläufe auf der Fertigungsebene mit einer deutlich reduzierten Komplexität ab, indem sie die relevanten Informationen verdichten. Stellvertretend für eine hohe Anzahl von Kennzahlen sind im Produktionsumfeld der OEE-Index, die Durchlaufzeit, sowie der Lean-Performance-Index zu nennen (Kletti und Deisenroth 2012). Ein Überblick über Kennzahlen auf der Fertigungsleitebene ist im VDMA-Einheitsblatt VDMA 66412 vorzufinden, welches eine strukturierte Gesamtheit von Kennzahlen für ME-Systeme vorstellt. Diese Kennzahlen werden mit Hilfe von beispielsweise Feinplanungsdaten, Produktdaten, Qualitätsdaten, Fertigungsdaten, Personalzeitdaten und Maschinendaten gebildet. Bei der Datenerfassung ist die manuelle Erfassung mittels BDE weit verbreitet. Dadurch liegen die

2 Grundlagen

Ergebnisse und Auswertungen jedoch mit Zeitverzug vor, was die Auftragsüberwachung erschwert und ein schnelles Eingreifen verhindert (Kletti und Deisenroth 2012).

3 Stand der Forschung

3.1 Übersicht

Aufbauend auf den Anforderungen an eine Produktionsregelung werden im Kapitel „Stand der Forschung“ für die Arbeit relevante Forschungsansätze diskutiert. Im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit können die folgenden Abschnitte in die zwei Teilbereiche Produktionsregelung und Informationsmanagement unterteilt werden.

Im Folgenden werden Arbeiten aus dem Bereich der Produktionsregelung dargestellt. Der Abschnitt 3.3 beschäftigt sich mit Arbeiten aus dem Bereich des Informationsmanagements von Produktionssystemen. Dies umfasst die Architektur von Informationssystemen und die aktuelle Forschung hinsichtlich CPPS. Aus der Bewertung der vorgestellten Arbeiten hinsichtlich der Relevanz für diese Arbeit resultiert die Ableitung des Handlungsbedarfs im Abschnitt 3.4.

3.2 Ansätze zur Produktionssteuerung und -regelung

3.2.1 Allgemeines

Hinsichtlich der Zielsetzung der Arbeit werden in diesem Abschnitt Ansätze zur Produktionssteuerung und -regelung dargestellt und diskutiert. Ziel dieser Ansätze ist die Ausführung von Steuerungs- bzw. Regelaufgaben, wie Auftragsfreigabe, Kapazitätsanpassung und Reihenfolgenbildung. Ein vielversprechender Ansatz zur Steuerung von dezentralen Maschinen sind Multi-Agenten-Systeme (MAS), die im Abschnitt 3.2.2 vorgestellt werden. Der Einsatz von MAS erlaubt Steuerungsentscheidungen mittels Künstlicher Intelligenz (KI). Im Weiteren reflektiert der Text regelbasierte Ansätze zur Produktionssteuerung, die aufgrund von Ereignissen aus der gesamten Produktionskette Entscheidungen durch ein vorab definiertes Regelwerk treffen (vgl. Abschnitt 3.2.3). Die ereignisinitiierte Regelung von Produktionssystemen basiert auf den Strukturen der Regelungstechnik, wie sie in Abschnitt 2.5 beschrieben wurden. In Abschnitt 3.2.4 werden methodische Ansätze, bestehend aus den Grundkomponenten der Regelungstechnik und mathematischen Modellierungsmethoden, für Anlagen und Maschinen vorgestellt.

3.2.2 Multi-Agenten-Systeme

Ein Technologieansatz, der in der Lage ist, die in Abschnitt 2.1.4 beschriebenen Anforderungen zu erfüllen, ist das MAS, das aus der Domäne der KI stammt. Kernbestandteil ist der sog. Agent, „[...] eine Softwareeinheit, die selbstständig in ihrer Umgebung handelt, um Aufgaben im Auftrag von Menschen zu erfüllen“ (Vogel-Heuser et al. 2015). Broy und Geisberger (2012) definieren einen Agenten auf ähnlich abstrahierte Weise:

„An intelligent agent is generally regarded as an autonomous decision-making system, which senses and acts in some environment.“

In der Literatur gibt es zwar verschiedene Begriffsdefinitionen von Agenten aber auch eine einheitliche Zuordnung von Eigenschaften. Basierend auf den Erkenntnissen von Monostori et al. (2006b) besitzen Agenten Eigenschaften wie Autonomie, Reaktivität, Adaptivität und Rationalität.

Weigelt (1994) evaluiert den Einsatz von Agenten-Systemen für eine dezentrale Produktionssteuerung mittels entwickelter Koordinations- und Planungsverfahren mit zentralen Ansätzen. Zu diesem Zweck werden insbesondere für dezentral organisierte Produktionsbetriebe adäquatere Instrumente zur Feinsteuerung und Überwachung des Fertigungsablaufs konzipiert und prototypisch implementiert (Weigelt 1994).

Besondere Relevanz der Anwendung von MAS im Bereich der PPS weisen Arbeiten von Monostori et al. (2006a) auf. Hierzu existieren Ansätze insbesondere im Kontext holonischer Fertigungssysteme, auch Holonic Manufacturing Systems (HMS) genannt (Valckenaers und van Brussel 2005). Babiceanu und Chen (2006) weisen darauf hin, dass holonische Systeme bisher in der Praxis nur wenig verbreitet sind. Als Ursache wird neben den Geschäftsstrategien der Unternehmen der schwierigere Entwicklungsprozess für derartige Systeme genannt. Ziel der o.g. Methoden ist es, einen Beitrag zu liefern, um genau diesen letztgenannten Punkt durch eine für den Logistikexperten handhabbare Methodik zu vereinfachen (Babiceanu und Chen 2006).

Auf den Vorarbeiten aufbauend, beschreibt Mönch (2006) einen theoretischen Steuerungsansatz für komplexe Produktionssysteme auf Basis eines MAS. Mit der PROSA-Referenzarchitektur für HMS (van Brussel et al. 1998) wird die softwaretechnische Realisierung des geforderten Steuerungsverhaltens abgeleitet und die notwendige Agentenhierarchie gewahrt. Anschließend werden Entscheider-Agenten den Stratifikations- und Staffelungselementen methodisch zugeordnet. Diese

sind für die Entscheidungsfindung der durch sie repräsentierten dynamischen und statischen Systembestandteile zuständig. Produktionssystem-Agenten, Produktionsbereichs-Agenten, Batch-Agenten und Agenten zur Repräsentation von vorbeugenden Instandhaltungsaufträgen werden verwendet.

Ein Beitrag von Borangiu et al. (2016) stellt eine Anwendung im Bereich der Logistik für Schmelzprozesse vor. Der vorgeschlagene HMS-Ansatz basiert auf der Kommunikation und Koordination von mehreren Holons zur Repräsentation der Ressourcen, wie Schmelzöfen, Bearbeitungsressourcen und Kräne. Der beschriebene Ansatz wurde zwar mit einem positiven Ergebnis getestet, jedoch erfolgte dies nur in einer Simulationsumgebung.

Die Arbeit von Rösch (2021) erläutert einen MAS-Ansatz mit Reinforcement Learning zur energieorientierten PPS. In einem Produktionssystem der dezentralen Systemarchitektur arbeiten mehrere autonome Agenten, wie die Speicher- und Marktagenten, an einer energieoptimierten Produktionssteuerung. Hierfür wurden spezifische Belohnungsfunktionen formuliert, die mittels der jeweiligen Agenten erfüllt werden. Die Arbeit des Autors wurde gezielt für die energieoptimierte Produktionssteuerung entwickelt und beschränkt sich auf Produktionsumgebungen mit einem hohen Energieverbrauch zugunsten einer wirtschaftlichen Umsetzung.

3.2.3 Complex Event Processing

Ein Complex-Event-Processing (CEP)-System, kann in der IT-Architektur als Middleware zwischen Informationsquellen und -interessenten betrachtet werden. Die Ereignisquellen und -konsumenten werden durch Einbezug eines CEP-Systems entkoppelt (Luckham und Schulte 2008). Die Weiterverarbeitung, Filterung usw. von Ereignissen wird dabei von der CEP-Middleware übernommen. Das CEP-System kann dabei als zentrales sowie dezentrales hierarchisches Informationssystem implementiert werden. Zu den Randbedingungen des grundsätzlichen Aufbaus eines CEP-Systems zählen die Anzahl der Informationsquellen, die Echtzeitanforderungen an die Verarbeitung und die Entwicklungskosten (Bruns und Dunkel 2010). Grundsätzlich eignet sich dieser Ansatz zur Integration von heterogenen Einheiten in übergeordnete Systeme, wie einer Produktionsüberwachung und -steuerung (Eckert und Bry 2009; Hutchison et al. 2008).

Das CEP-System zur Überwachung greifen Hasan et al. (2011) auf und nutzen es, um den Energieverbrauch in einem Gebäude zu kontrollieren. Hierzu wurde ein Assistenzsystem entwickelt, das unter Anwendung bestehender Regeln und dank

3 Stand der Forschung

empfangener Ereignisse Störungen im Energieverbrauch erkennt. Mit den implementierten Regeln lassen sich die Störungen erfassen. Das Ergreifen von Maßnahmen erfolgt durch einen Mitarbeiter.

Starke et al. (2013) erweitern den zentral hierarchischen Ansatz um eine Serviceorientierte Architektur (SOA) für flexible Produktionssysteme. Die Vernetzung der Produktionsressourcen wird zur dezentralen Steuerung der Handlings- und Transportaufgaben genutzt. Dieser Ansatz kann die Echtzeitanforderungen erfüllen.

Kropp und Schuh (2014) führen den Dezentralisierungsgedanken hinsichtlich der Informationsverarbeitung weiter und entwickeln eine dreistufige Kaskadierungsstruktur zur Regelung der Logistik- und Produktionsvorgänge. Diese besteht aus einem Master-, einem Slave- und einem Produktionsregler und reagiert auf Ereignisse sowie Abweichungen von der Kennzahl OEE. Zur Umsetzung der Kaskadierungsstruktur wurde ein generisches Ereignismodell entwickelt, das sich auf den Zustand und die Qualität des Produkts fokussiert.

Krumeich et al. (2014) beschäftigen sich mit einer Methode zur Prognose von Produktionsabläufen auf Basis des CEP-Systems. Sie kombinieren dabei aktuelle Ereignisse von Produktionsressourcen und integrieren diese in mehreren Arbeiten in mit historischen Informationen gewonnene Regeln. So kann agil entschieden werden, wie wahrscheinlich das Eintreten eines Ereignisses in der Produktion aufgrund des aktuellen Maschinenzustands ist. Die Integration von CPS in der Produktion steigert erheblich die Eintrittswahrscheinlichkeit der Prognose durch die detaillierteren Informationen. Eine Evaluierung des Ansatzes im Rahmen der Qualitätskontrolle bei der Herstellung von Flachstahl zeigt jedoch noch Forschungsbedarf im Bereich der Ereignisverarbeitung (Krumeich 2015).

Angelehnt an die DIN SPEC 91329 hat Pielmeier (2019) eine dreistufige Architektur für eine CEP-basierte Produktionssteuerung entwickelt. Zum Informationsaustausch in dieser Architektur wird der EPCIS Standard um ein fünftes Attribut das „Wie“ erweitert (Pielmeier et al. 2017). Zugunsten einer praktischen Anwendung werden die Anforderungen an das Ereignismodell und die Verarbeitung formuliert. Die zur Verarbeitung notwendigen Regeln basieren dabei auf einem dreistufigen Konzept, das von der Verfügbarkeit von historischen Daten abhängt (Pielmeier et al. 2018a). Eine Evaluierung in einem Simulationsmodell zeigt, dass bei ausreichenden historischen und aktuellen Daten eine Verbesserung eines Rüstvorgangs und eine Reduzierung der Kosten möglich ist (Pielmeier et al. 2018b).

3.2.4 Produktionsregelung

Die Problemstellung der Regelung von Produktionssystemen wurde in mehreren Arbeiten untersucht und ist in unterschiedlichsten Bereichen der Produktionssteuerung und -regelung angesiedelt. Somit werden die Begriffe Produktionssteuerung und -regelung in diesem Abschnitt synonym verwendet. Vereinzelt greift der Text Teilaspekte der Produktionsregelung heraus, optimiert sie jedoch in einer von der Gesamtsystematik isolierten Betrachtungsweise. Zur Gliederung der einzelnen Entwicklungsrichtungen wird das Konzept der Produktionsregelung in die vier Untersuchungsbereiche Regelstruktur, Rückführung, Reglertyp und Regelstrecke unterteilt. Dies geschieht in Anlehnung an den in Abschnitt 2.5.1 vorgestellten Regelkreis.

Regelstruktur

Die Auswahl der Arbeiten zur *Regelstruktur* wurde hinsichtlich der Anordnung von Regeleinheiten in der Fertigung eingegrenzt.

Burger (1992) entwickelte ein Konzept für die Regelung zeitvarianter Produktionssysteme, dessen Kernpunkt die Erweiterung der Produktionssteuerung hin zu einer Produktionsregelung mit aufgabenunterstützenden Systemkomponenten ist. Mit der Analogie eines kaskadierten Regelkreises wird die PPS als dezentral organisiertes und vernetztes System mit mehreren hierarchischen Ebenen dargestellt. Ein wesentlicher Aspekt ist der Einsatz von simulativ bewerteten Maßnahmen, die auf der Ebene einer einzelnen Maschine den Auftragsdurchlauf optimieren, die Steuerung verbessern und die Transparenz der Prozesse erhöhen (Burger 1992).

Mößmer (1999) beschreibt in seiner Arbeit die Erweiterung bisheriger Produktionssteuerungsverfahren um eine Planungsmethode, die sich aus einer Analysephase, einer Umplanungsphase und einer Bewertungsphase zusammensetzt. Um den unterschiedlichen zeitlichen Anforderungen bei der Planung und Umsetzung des Maßnahmenkatalogs zu entsprechen, wurde ein kaskadierter Regler, der die Planungsmethode enthält, entworfen. In dieser Planung werden Ablaufsimulationen eingesetzt, um genaue Aussagen bezüglich der Auswirkungen einzelner Maßnahmen treffen zu können. In der Umsetzung unterstützen die Ablaufsimulationen dabei, frühzeitig Abweichungen zum Sollverlauf zu erkennen (Mößmer 1999).

Pritschow und Brinzer (2002) definieren in ihrer Arbeit eine Struktur für ein Regelnetzwerk zur Produktionsregelung, in dessen Zentrum eine Leistungseinheit aus Werker und Fertigungseinrichtung steht (Pritschow und Brinzer 2002). Jede

3 Stand der Forschung

Leistungseinheit besteht aus Kapazitäts-, Bestands- und Prioritätsregler, die jeweils in einer Kaskade angeordnet sind. Ein fester Bestandteil der Struktur ist eine für die Produktionsregelung globale Kostenfunktion. Diese Ergänzung löst den Konflikt der logistischen Zielgrößen teilweise auf (Pritschow et al. 2003).

Hamann (2008) entwickelte ein Reglerkonzept, das zum einen neuronale Netze zur dezentralen Regelung der Bestände nutzt und zum anderen mittels des heuristischen Algorithmus des Simulated Annealing optimale Sollbestände ermittelt. Mit seinem Ansatz untersuchte der Autor einen neuen Lösungsweg zur Optimierung der Produktionssteuerung (Hamann 2008).

Das Vorgehen von Münzberg und Nyhuis (2009) basiert auf dem Fertigungsmodell nach Lödding (2016). Die enthaltenen Regler sind in dem kaskadierten Regelungsmodell berücksichtigt; allerdings ist die Anordnung der drei Regler in diesem Vorgehen nicht fest definiert. Die entwickelte Methode sieht vor, dass für jede Arbeitsstation auf Grundlage der vier logistischen Zielgrößen die Reihenfolge der Regeleinheiten zu bestimmen ist (Nyhuis et al. 2009b). Eine Validierung des Vorgehens findet im Produktionsbereich der Montage eines Automobilzulieferers statt. Hier zeigten sich vielversprechende Ergebnisse. Die Validierung der Methode für Produktionsstätten mit Arbeitssystemen wurde vom Autor nicht vorgenommen (Münzberg et al. 2012).

Rückführung

Die *Rückführung* der Ereignisse von Produktionsressourcen zu übergeordneten Systemen ist der Fokus der Auswahl für die folgenden Arbeiten.

Der Ansatz von Zetlmayer (1994) unterscheidet sich von Burger (1992) durch die Integration einer prädiktiven Reaktion, die auf eine kurzfristige Kompensation von internen und externen Störungen abzielt. Dieser Ansatz verwendet ein zentrales Simulationsmodell der Produktionsanlagen und -abläufe als Hilfsmittel zur Regelung und ermöglicht somit die Beherrschung der Totzeiten im Regelkreis. Das Simulationsmodell dient sowohl als Planungsinstrument als auch als Test- und Prognosewerkzeug zur Bewertung von Umplanungsmaßnahmen in der Maschinenbelegung.

Die Arbeit von Engelhardt (2015) beschreibt ein System zur RFID-gestützten (Radio-Frequency Identification) und situationsbasierten Produktionssteuerung, das aus den drei Systemelementen Produktionsmodularisierung, Informationsmanagement und Steuerungsverfahren besteht. Die steuerungsorientierte Produktionsmo-

dularisierung fasst Arbeitssysteme strukturiert und logisch zu Produktionsmodulen zusammen. Das Informationsmanagement ist RFID-basiert und besteht aus dem Steuerungsassistenzsystem sowie einem Ereignisverwaltungssystem. Die situationsbasierten Steuerungsverfahren umfassen eine synchrone zweistufige Auftragsfreigabe, eine situationsbasierte Reihenfolgebildung mit intermodularer Schlupfzeitverteilung und eine intramodulare Rückstandsregelung. Sie bilden damit den Kern des Produktionssteuerungssystems (Engelhardt 2015).

Im Mittelpunkt der Entwicklung von Kropp und Maasem (2015) stehen die Ereignisse und Ereignisregeln für die Produktionssteuerung. Zur Definition der geeigneten Ereignisse aus der Produktion kommt ein sechsstufiges Vorgehen zum Einsatz (Kropp und Maasem 2015). Mit diesem Vorgehen kann für sieben Zielgrößen, u. a. Termintreue, Durchlaufzeit Reihenfolgeabweichung und Prozessergebnisqualität, ein Datenmodell erstellt werden. Für die Verarbeitung der Ereignisse wird ein zweistufiger Master-Slave Controller zur Zielgrößenreicherung genutzt. Die Anwendung des Ansatzes setzt eine detaillierte Kenntnis über die in der Produktion vorhandenen Sensoren voraus und benötigt ein umfangreiches starres Datenmodell (Kropp und Schuh 2014).

Reglertyp

Für die Auswahl der Arbeiten zum *Reglertyp* liegt der Schwerpunkt auf der Integration der Regemaßnahmen in einen bestehenden Fertigungsablauf.

Bamberg (1996) legte den Schwerpunkt seiner Forschung auf die Entwicklung einer eigenständigen und adaptiven Störungsmanagement-Komponente, die eine automatisierte und eine manuelle Umplanung zulässt. Durch Verfahren des Operation Research und der KI trifft er eine Auswahl der Methoden und entwickelte Strategien zur Umplanung. In Abhängigkeit von einer variablen Zielfestlegung der drei Parameter Durchlaufzeit, Kapazitätsauslastung und Termintreue steht die transparente Bewertung der Methoden im Vordergrund der Entwicklung (Bamberg 1996).

Die Arbeit von Burkhalter (2010) umfasst eine Methode zur Entwicklung einer Steuerungs- und Regelungsstrategie für produktionstechnische Systeme. Bei der Lösung handelt es sich um eine Heuristik zur dynamischen Steuerung und Regelung von Fertigungssystemen. Die entwickelte Steuerungs- und Regelungsstrategie stellt keinen ERP/MRP-II-Ersatz dar, sondern wirkt als Ergänzung zu bereits implementierten Steuerungssystemen. Das zentrale Element der Methode ist der Prio-Quotient, der für jeden Fertigungsauftrag ermittelt wird. Der Prio-Quotient ist

3 Stand der Forschung

eine Einheit der Auftragsdringlichkeit. Dazu wird die für den verbleibenden Durchlauf des Fertigungsauftrags benötigte Dauer ins Verhältnis zu der verbleibenden Dauer bis zum Liefertermin gesetzt. Der Fertigungsstatus wird dabei ereignisorientiert aktualisiert. Durch diesen geschlossenen Wirkungsablauf im Regelkreis ist es möglich, auf kurzfristige stochastische Ereignisse, die auf das Fertigungssystem einwirken, entsprechend zu reagieren (Burkhalter 2010).

Niehues (2016) hat ein System zur adaptiven Werkstattsteuerung auf Basis von Kapazitätsstörungen, Bewegungsverläufen, Auftragsstart- und endzeitpunkten entwickelt. Die Informationsverarbeitung dieser Ereignistypen erfolgt mittels einer zentralen hierarchischen Steuerungsarchitektur. Bei diesem Ansatz erfolgt der Steuerungseingriff bei Störungen ausschließlich mittels einer Reihenfolgesteuerung, die auf alle Fertigungssysteme einwirkt. Die Zielfunktionen der reihenfolgeabhängigen Planung sind u. a. Bestandskosten, terminbezogene Kosten und Rüstkosten. Für deren Ermittlung wurde ein spezielles Datenmodell entwickelt. Die Grundvoraussetzung für diesen Ansatz ist, dass in untergeordneten Hierarchieebenen die Arbeitsvorgänge innerhalb vorgegebener Grenzen frei koordiniert werden können sowie Übergangspufferbestände zwischen den Fertigungssystemen bestehen (Niehues 2016).

Regelstrecke

Bei der Auswahl von Arbeiten zur *Regelstrecke* wurden diejenigen fokussiert, die eine modellbasierte Darstellung entwickelt haben, um die Produktionsleistung von Anlagen und Maschinen in einer Fertigung zu simulieren.

In dem Regelungsansatz von Simon (1995) wird der vorausschauenden Regelung, die bei Zetlmayer (1994) eingeführt wird, eine adaptive Komponente hinzugefügt, die die Regelparameter der geänderten Regelstrecke anpasst. Die kleinste logische Einheit der Regelstrecke sind die Arbeitssysteme; diese münden in eine kennzahlenorientierte Modellierung. In seinem Konzept der Fertigungsregelung gibt es analog zur Fertigungssteuerung die vier Grundkomponenten Planen, Durchsetzen, Überwachen und Sichern. Die Planungskomponente der Regelung erhält die Auftragsdaten und Zielvorgaben vom PPS-System und plant die optimale Reihenfolge der Maschinen und Aufträge. Selektiv kann der Belegungsplan in Abhängigkeit vom Störungsmanagement geändert werden. Für die Überprüfung der Verfügbarkeiten ist die Durchsetzungskomponente zuständig, die auch den Auftragsplan umsetzt. Die Erfassung und die Visualisierung relevanter Auftrags- und Maschinendaten sowie die Anpassung des Modells bei veränderter Fertigungssituation über-

nimmt die Überwachungskomponente. Die Maßnahmen für die operative und logistische Entstörung steuert das Störungsmanagement, welches auch Störungsprävention betreibt (Simon 1995).

Petermann (1996) erstellte ein kontinuierliches Modell des Produktionsprozesses auf Basis des Durchlaufelements (Bechte 1984), des Trichterdiagramms und der Betriebskennlinie. Durch klassische Anwendung der Regelungstheorie werden kontinuierliche Bestands- und Rückstandsregler realisiert. Der Bestandsregler verwendet die Zugangsrate als Stellgröße für den Bestand, während der Rückstandsregler die Kapazität des Arbeitssystems nutzt. Die Abweichung der Soll-Ist-Leistung wird über die Zeit integriert und bildet die Basis für die Berechnung der erforderlichen Leistung zur Rückstandsminimierung. Bei Abweichungen des Soll-Ist-Bestands passt der Bestandsregler die Zugangsrate an, bis die Abweichungen aufgehoben sind. Unter Anwendung dieses Reglerkonzepts können die Durchlaufzeiten und der Bestand durch die Synchronisation von Kapazitätsangebot und Kapazitätsbedarf unter dynamischen Bedingungen konstant gehalten werden. Die mathematische Beschreibung der Regelstrecke mittels Gleichungen ermöglicht die Berechnung des zeitlichen Verhaltens. Dabei wird auf die Theorie der Regelungstechnik zurückgegriffen (vgl. Abschnitt 2.5.2). Durch entsprechende Transformationen vom Zeit- in den Frequenzbereich und umgekehrt kann das dynamische Verhalten beschrieben werden. Mit Hilfe dieser Methodik wurde eine Auswahl der Regler und eine Ableitung von Einstellvorschriften vorgenommen. Dank einer Simulation gelang es zudem nachzuweisen, dass die Betrachtung eines diskreten Produktionsvorganges mittels eines kontinuierlichen Modells grundsätzlich zulässig ist. Bei den entwickelten Modellen wurde von kontinuierlichen Leistungskurven ohne eine Minderung, wie z. B. Verschleiß, ausgegangen. Eine dynamische Anpassung der Modellparameter an die aktuelle Situation wurde nicht vorgesehen. Das Modell des Autors bildet zudem nur ein einzelnes Arbeitssystem ab (vgl. Abbildung 16). Es fehlt die Möglichkeit, die Modelle miteinander zu verknüpfen, um einen mehrstufigen Produktionsprozess abzubilden (Petermann 1996).

Die Forschungsarbeit von Breithaupt (2001) basiert auf Petermann (1996) und baut dessen kontinuierliches Reglermodell aus (Wiendahl und Breithaupt 2000). Durch die Verwendung von Übergangserwartungsmatrizen, die aus den Rückmeldedaten und Plandaten erstellt werden können, wird das Modell um zusätzliche Ein- und Ausgänge erweitert. Dadurch können nicht nur einzelne Arbeitssysteme, sondern beliebig viele berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 16). Mit der Kennlinientech-

3 Stand der Forschung

nik gelingt es, darauf aufbauende Reglerkonzepte leicht parametrisiert für die erfolgreiche Regelung einer Produktion zur Erfüllung der logistischen Zielgrößen einzusetzen (Breithaupt 2001).

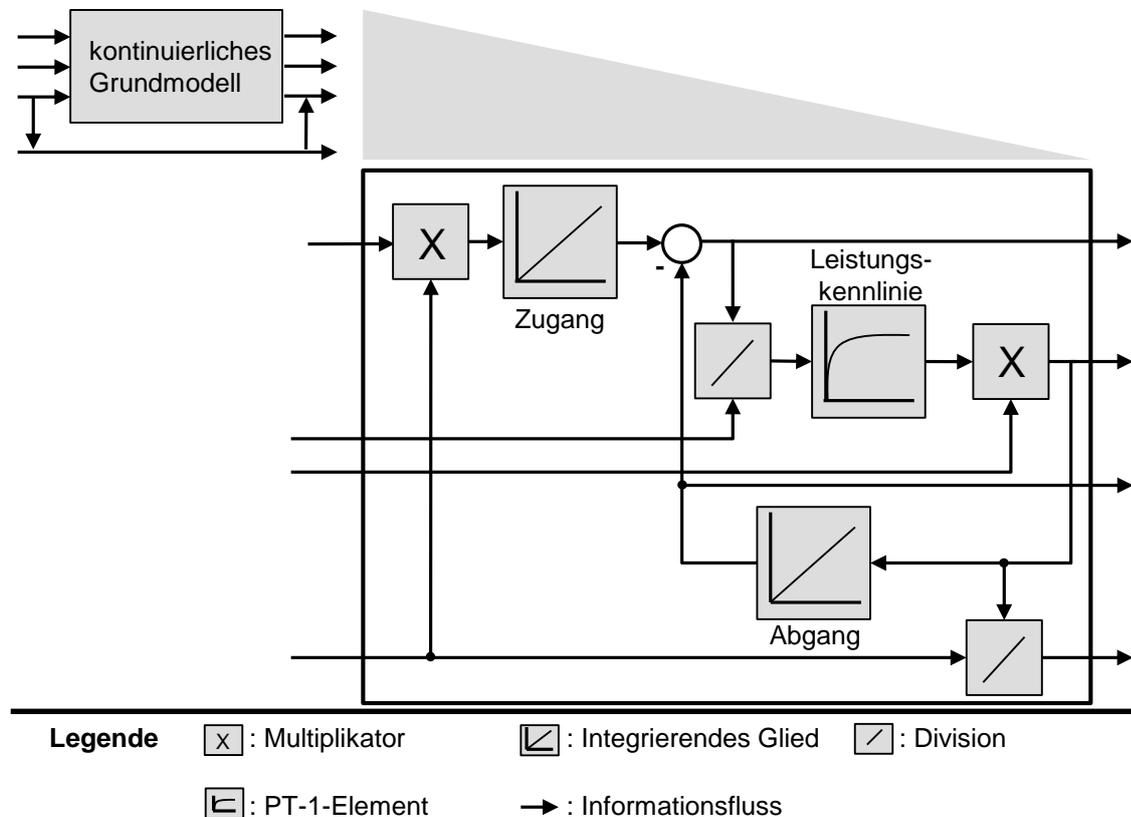


Abbildung 16: Kontinuierliches Arbeitsmodell, angelehnt an Petermann (1996) und Breithaupt (2001)

In der Forschungsarbeit von Knollmann (2014) steht die logistische Zielgröße der Durchlaufzeit in der Produktionsregelung im Fokus. Für eine exakte Regelung der Zielgröße erfolgen eine mathematische Beschreibung und eine Klassifikation der Ereignisse, die sich negativ auf die Durchlaufzeit auswirken (Knollmann 2014). Die mathematischen Modelle werden in regelungstechnische Modelle übertragen, die auf Arbeiten von Petermann (1996) und Duffie und Falu (2002) basieren. Das Modell eines Arbeitssystems wird mit einem Work-in-Process-Regler (WIP-Regler) und einem Kapazitätsregler in zeitdiskrete Regelkreise integriert (Knollmann und Windt 2013).

Prognose

Die folgende Betrachtung von Arbeiten zur *Prognose* beschränkt sich auf die Ableitung von Zuständen in der Zukunft auf Basis von regelungstechnischen Methoden.

Über die Arbeiten zur Regelstrecke hinaus hat Petermann (1996) einen Beitrag zur Prognose der Zustände der Arbeitssysteme geleistet. Darin werden Stabilitätsuntersuchungen mittels der Bode-Methoden durchgeführt. Allerdings geschieht diese Betrachtung nur auf der Ebene eines Arbeitssystems.

In der Arbeit von Duffie und Falu (2002) wird festgestellt, dass eine kontinuierliche und zeitdiskrete Modellierung hinsichtlich des Verhaltens einem Produktionssystem vergleichbar ist. Die Untersuchungen schließen den Bereich der Prognose der Stabilität mit ein und weisen diesem Bereich eine Bedeutung zu.

Dashkovskiy et al. (2007) hat in mehreren Arbeiten gezeigt, dass mittels Methoden der Stabilitätsberechnungen Prognosen über Zustände von Produktionsnetzwerken getätigt werden können (Dashkovskiy et al. 2007). Dies schließt ebenfalls die Berücksichtigung von Totzeiten in einem Produktionsnetzwerk ein (Dashkovskiy et al. 2011). Die dargestellten Methoden wurden nicht für reale Produktionsnetzwerke genutzt bzw. an solchen evaluiert.

Der Beitrag von Kreowski et al. (2011) stellt ein Schema für die Stabilitätsanalyse von autonom gesteuerten Produktionsnetzwerken für Transportvorgänge dar. Dort werden Produktionsnetzwerke durch Differentialgleichungen und diskrete Ereignisse modelliert und die Zeitverzögerungen beim Transport berücksichtigt. Dieser Ansatz bietet Vorteile durch den geringeren Zeitaufwand. In einer weiteren Arbeit wird ein Konzept für den Umgang mit Zeitverzögerungen betrachtet (Kreowski et al. 2013).

Ein dynamisches Modell eines Produktionsnetzwerks auf Basis des Zustandsraums stellt die Arbeit von Zhang et al. (2016) dar. Die Störeinflüsse werden mathematisch durch eine Übertragungswahrscheinlichkeitsmatrix von einem Produktionsnetzwerk berechnet. Zudem wird ein Verfahren zur Neuberechnung der Transferwahrscheinlichkeitsmatrix der Auftragsabläufe vorgeschlagen. Durch die Darstellung der Produktion in einem Zustandsraum entsteht ein hoher Aufwand für die Prognose von zukünftigen Zuständen des Produktionssystems (Zhang et al. 2016).

Bendul und Knollmann (2016) untersuchten die Rahmenbedingungen für Prognosen u. a. auf Grundlage der Trichtertheorie. Anhand einer Fallstudie zeigen die Autoren, dass sich Prognosen über die Durchlaufzeit als aussagekräftige Kennzahl darstellen lassen. Mit ihrer Arbeit wurde gezeigt, dass die Stabilitätsuntersuchungen und deren Darstellungen für Prognosen eine sinnvolle Maßnahme sind (Bendul und Knollmann 2016).

3 Stand der Forschung

Jeken et al. (2012) zeigen mit ihrem Ansatz, dass Änderungen in der Produktionsreihenfolge durch Steuerungseingriffe kontraproduktiv sein können, wenn die Instabilität der Auftragsdurchlaufzeit die Erreichung der logistischen Ziele gefährdet (Duffie et al. 2016). In diesem Beitrag werden dynamische Modelle verwendet, um die Instabilität des Arbeitssystems zu charakterisieren. Die Modellparameter werden in Abhängigkeit von der Vorlaufzeit berechnet. Industriedaten veranschaulichen, dass dieser Ansatz bei der Auswahl von Produktionsplanungs- und Steuerungsparametern als Orientierungshilfe dienen kann. Das Ziel besteht darin, Stabilität als wichtige dynamische Grundlage für die Erfüllung der Leistungsziele der logistischen Arbeitssysteme sicherzustellen.

In einer weiteren Veröffentlichung von Duffie et al. (2017) wird die Evaluierung von zwei Steuerungsmethoden anhand einer modellierten Stahlfabrik betrachtet. Für beide Ansätze werden Gleichungen aufgestellt, die es ermöglichen, Trends im dynamischen Verhalten als Funktion von Verzögerungen bei der Beschaffung von Produktionsinformationen zu charakterisieren. Der vorgestellte analytische Ansatz zeigt, dass mittels Gleichungssystemen eine realistische Prognose über Leistung und Robustheit von Produktionssystemen erfolgen kann (Duffie et al. 2017).

3.3 Informationsmanagement in Produktionssystemen

3.3.1 Allgemeines

Das Informationsmanagement ist eine wesentliche Grundlage für eine erfolgreiche Ausführung der Aufgaben der Produktionsregelung. Hierbei muss im Sinne eines zielgerichteten Informationsflusses sichergestellt werden, dass die notwendigen Daten in der richtigen Menge und Qualität rechtzeitig dem jeweiligen System zur Verfügung stehen (Jünemann und Beyer 1998). Dass diese informationslogistischen Anforderungen nur unzureichend erfüllt werden, ist einer der wesentlichen Gründe dafür, dass die angestrebten logistischen Zielgrößen eines produzierenden Unternehmens verfehlt werden (Schuh et al. 2008; Wiendahl 2008). Das Informationsmanagement teilt sich in die drei Bereiche Informationsstrukturen (Abschnitt 3.3.2), Datenhaltung (Abschnitt 3.3.3) und Architekturkonzepte (Abschnitt 3.3.4) auf.

3.3.2 Informationsstrukturen von Produktionssystemen

Die Basis eines Systems zur Produktionsregelung sind die Informationsstrukturen zwischen den Fertigungsebene und den übergeordneten Ebenen (vgl. Abschnitt 2.6.2). Die Ausgestaltung dieser informationstechnischen Aufgabe ist unter dem Gesichtspunkt der Regelung immer ein geschlossener Kreis, was zu einer Regelung der Abläufe des Produktionssystems führt (Westkämper und Löffler 2016). Der Aufbau dieser Informationsstrukturen hat dabei einen erheblichen Einfluss auf die Reaktionsgeschwindigkeit, auf Ereignisse, die Komplexität des Systems und auf die Einbindung heterogener Arbeitssysteme (Permin 2016; Schuh et al. 2007; Scholz-Reiter und Freitag 2007). Eine Unterscheidung der Informationsstrukturen kann hinsichtlich der Verteilung der regelnden Entitäten in die drei Grundklassen zentrale-, dezentrale- und hybride hierarchische Informationsstruktur erfolgen (Bongaerts et al. 2000).

Zentrale hierarchische Informationsstrukturen

Die bisherige traditionelle Sicht der PPS fasst das gesamte Produktionssystem als ein zentral hierarchisches System auf. Es beruht in seinem zugrunde gelegten Funktionsprinzip auf einer deterministischen Betrachtung der technologischen und logistischen Produktionsabläufe (Jiao et al. 2009). Basis dafür ist die Annahme, dass der Ablauf der Produktion mit einem hohen Genauigkeitsgrad vorhersagbar ist (Trentesaux 2009). Bei dem Eintreten von Planabweichungen, wie Störungen in der Produktion, ist die notwendige Reaktionsfähigkeit gering, da die zur Entscheidungsfindung erforderlichen komplexen Umplanungsschritte kaum durchzuführen sind. Zentrale Informationsstrukturen eignen sich deshalb weniger für die Anwendung in stabilen, deterministischen Umgebungsbedingungen, welche vorwiegend in der Großserienfertigung zu finden sind (Borangi et al. 2015; Trentesaux 2009).

Dezentrale hierarchische Informationsstrukturen

In Strukturen zur dezentralen PPS sind die Funktionen auf mehrere unterschiedlichen Ebenen verteilt (vgl. Abschnitt 2.6). Die übergeordnete zentrale Planungsebene stellt über einen mittelfristigen Planungshorizont die Produktionsprogramme der jeweiligen Arbeitssysteme des Unternehmens auf. Der Materialfluss zwischen den Arbeitssystemen wird durch Vorgabe von Ereignissen, wie Eckterminen für die einzelnen Produktionsaufträge, koordiniert. Dieser Ansatz wird von Scholz-Reiter et al. (2006) im Bereich der Selbststeuerung von Transportprozessen verfolgt und in die Produktion übertragen. Die nötige Termingrobplanung basiert

auf bereits vorhandenen Kundenaufträgen und bei Bedarf auf kurzfristigen Absatzprognosen (Hauptvogel 2015; Schuh et al. 2013). Hierbei wird eine grobe kapazitive Betrachtung, insbesondere der Engpassressourcen, durchgeführt. Das Ergebnis ist ein Produktionsprogramm, das von den Arbeitssystemen in der Planungsperiode auszuführen ist (Unger et al. 2017; Wang 2013; Bischoff et al. 1999). In der dezentralen Planungsebene wird das Ergebnis der Produktionsprogrammplanung in jedem Arbeitssystem im Rahmen der Feinplanung spezifisch weiterbearbeitet. Insbesondere die Planungsfunktionen mit kurzfristigem Planungshorizont werden durch jedes dezentrale Arbeitssystem ausgeführt. Hierzu gehören insbesondere die Termin- und Kapazitätsplanung. Das Rückmelden des aktuellen Produktionszustands an die übergeordnete Planungsebene zur Beibehaltung der Transparenz geschieht gleichzeitig (Borangiu et al. 2015; Ostgathe 2012; Trentesaux 2009; Windt und Hülsmann 2007).

Hybride hierarchische Informationsstrukturen

Als Folge davon, dass sich immer häufiger Produktionen nur begrenzt deterministisch verhalten und Unternehmensorganisation zunehmend dezentralisiert sind, haben sich Konzepte zur PPS mit hybriden hierarchischen Informationsstrukturen entwickelt (Engelhardt 2015; Ostgathe und Zaeh 2013). Beispielsweise beim HMS-Ansatz kann das Gesamtunternehmen eine heterogene Struktur besitzen, was bedeutet, dass es aus mehreren teilautonomen Arbeitssystemen besteht (Borangiu et al. 2016; Monostori 2014; Laperrière und Reinhart 2014). Die Koordination der logistischen Abläufe in der Produktion zwischen den Arbeitssystemen erfolgt entweder über die übergeordnete Planungsebene oder direkt auf horizontaler Ebene zwischen den Arbeitssystemen. Das Konzept der hybriden hierarchischen Informationsstruktur integriert teilautonome Arbeitssysteme in die Produktion und damit einher kommt es zu einer Dezentralisierung der Fertigungssteuerungsfunktionen (Reinhart 2017; Franke et al. 2014).

Diese hybride Informationsstruktur erweist sich insbesondere dann als vorteilhaft, wenn die Arbeitssysteme in einem kurzfristigen Planungshorizont situationsbedingt und schnell auf plötzlich auftretende Ereignisse reagieren müssen (vgl. Abschnitt 2.3.3) (Kropp und Schuh 2014; Kletti und Schumacher 2011). Eine Integration der Fertigungssteuerung in die Arbeitssysteme bedeutet für die Auftragsfeinplanung, dass diese ebenfalls vollständig von den Arbeitssystemen ausgeführt wird. Im Funktionsablauf der PPS bedeutet das, dass die Aufgaben der Auftragsfeinplanung, die terminliche Abstimmung der Kapazitäten sowie die Termine grob mit den Produktionsaufträgen in einem Arbeitssystem abgeglichen werden. Dieser

Konflikt zwischen Kapazitäts- und Reihenfolgeplanung wird im Sinne einer bestmöglichen Zielerreichung der Fertigungssteuerungsziele gelöst (Bischoff et al. 1999).

Der kapazitive und terminliche Abgleich hinsichtlich der Machbarkeit des Produktionsprogramms in einer Planungsperiode wird dabei von der übergeordneten Planungsebene übernommen. An die Arbeitssysteme werden die Aufträge mit der notwendigen Beschreibung zur Auftragsbearbeitung übergeben. Der Kapazitätsabgleich findet auf einer groben Ebene statt, indem beispielsweise das Gesamtkapazitätsangebot der Arbeitssysteme dem Gesamtkapazitätsbedarf der Produktionsaufträge gegenübergestellt wird (Volling et al. 2013; Bischoff et al. 1999).

Die Arbeitssysteme sind damit in der Lage, das Produktionsprogramm innerhalb der technologischen und kapazitiven Möglichkeiten zu bearbeiten. Der Ressourceneinsatz, also die terminliche Zuordnung von Produktionsaufträgen und deren Arbeitsgängen, wird eigenständig durch das jeweilige Arbeitssystem geplant und auch verantwortet (Permin et al. 2016).

3.3.3 Ansätze der Datenhaltung

Die Informationsstrukturen sind essenziell für die organisatorische Nutzung und Verarbeitung der Produktionsereignisse in den übergeordneten Ebenen. Wesentliches Element bei den Informationsstrukturen ist die Datenhaltung (Frese 2000). Je nach geforderter Reaktionsgeschwindigkeit kommen verschiedene Konzepte, wie dezentrale und zentrale Datenhaltung, zur Anwendung. Diese Konzepte werden im Folgenden vorgestellt.

Ostgathe (2012) hat in seiner Arbeit ein Datenhaltungsmanagement für die Werkstattsteuerung entwickelt, das intelligente Produkte mit einem „Informationsrucksack“ in eine dezentrale hierarchische Informationsstruktur integriert. In diesem Zusammenhang werden die produkt- und prozessspezifischen Daten der produktindividuellen Prozesskette dezentral mittels RFID-Transponder am Werkstück hinterlegt. Die Planungsaufgaben werden auf globale und lokale Organisationseinheiten, die aus mehreren Arbeitssystemen zusammengesetzt sind, aufgeteilt. Weigelt (1994) und Sauer (2004) haben diesen Ansatz mit Produkt-Agenten anstatt RFID-Transpondern untersucht. Ein Produkt-Agent verwaltet Informationen zu Auftragsangaben, Produkttyp und Status.

Im Gegensatz zu Ostgathe (2012) nutzt Engelhardt (2015) hybrid hierarchische Informationen und den RFID-Transponder nur zur gezielten Übermittlung von

produktspezifischen Ereignissen. Die Ereignisse umfassen Produktinformationen in den Dimensionen Produkt mit auftrags- und produktspezifischen Informationen (Was?), dem Zeitpunkt (Wann?), dem Ort (Wo?) und dem Grund (Warum?) sowie steuerungsrelevante Produktionsergebnisse (Wie?) in Anlehnung an die EPC Information Services. Die Datenhaltung und Verarbeitung der Ereignisse geschieht in einem zentralen Ereignisverwaltungssystem (EVS), das sich in die zwei Subsysteme EVS-Datenbank und EVS-Initialisierungsapplikation unterteilt.

Dieser Ansatz wurde von Genc (2015) für ein Frühwarnsystem zur Absicherung der Wertschöpfung in der Lieferkette mit dezentralen Ereignisspeichern weiterentwickelt. Ein Teil dieser Arbeit ist unter anderem die Entwicklung von innerbetrieblichen Assistenzsystemen zur frühzeitigen Erkennung von Störungen in der Lieferkette.

Hauptvogel (2015) nutzt dieses Konzept für ein Assistenzsystem zur Unterstützung des Mitarbeiters im Rahmen der kurzfristigen Planung von stark vernetzten Produktionssystemen. Der Fokus liegt dabei in der Informationsbereitstellung um zu entscheiden, ob und welche Maßnahmen in der PPS ergriffen werden sollten.

Diese vorgestellten Ansätze der Datenhaltung setzen ein definiertes Datenformat, wie z. B. den GS1-Standard, voraus. Die nicht vorhersehbaren Ereignisse eines Produktionssystems erfordern allerdings, dass die Datenformate, etwa die EPC Information Services, der GS1 Organisation angepasst werden müssen.

3.3.4 Übergreifende Architekturkonzepte

Eine Architektur beschreibt die grundsätzlichen Strukturen zur Realisierung von Funktionalitäten und vereint mehrere Sichten in einem System (Goll und Dausmann 2013). Diese Beschreibung umfasst zum einen die Komponenten in einem System und zum anderen den Zusammenhang dieser Komponenten. Eine spezielle Form ist eine Referenzarchitektur, die eine technologisch unabhängige Beschreibung für eine bestimmte Domäne enthält (Krallmann et al. 2013; Cloutier et al. 2009).

Stark et al. (2016) stellen mit der Informationsfabrik ein Plattformkonzept von unterschiedlichen „digitalen Werkbänken“ vor, deren Erzeugnis der Produktionsfaktor Information ist. Die Architektur sieht einen gesicherten Informationskanal zur Kommunikation mit der Unternehmens-Cloud vor und bindet Drittanbieter und Apps in die Wertschöpfung ein. Im Rahmen der Forschung und Entwicklung wurden drei Anwendungsfälle realisiert, die sich allerdings sehr stark auf die Domäne

der Entwicklung von Komponenten konzentrieren. Eine Weiterentwicklung des Wertschöpfungsprozesses wurde nicht betrachtet.

Im Rahmen des Projektes „Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik“, CyProS, wurde ein Rahmenkonzept zur Integration von CPS in bestehende Produktionsumgebungen entwickelt. Das resultierende Vorgehensmodell umfasst eine Beschreibung von Rollen und Entitäten, wie Cyber-physischen Transportsystemen (CPTS) für den Transport, eine Cyber-physische Infrastruktur (CPI) zur Versorgung und Bereitstellung der Umgebung und das Cyber-physische Produkt (CPP) in einem CPPS zur Herstellung von Produkten (Kolberg et al. 2017a; Reinhart et al. 2015). Die dabei entwickelte dezentrale Architektur konzentriert sich auf die Abhängigkeiten zwischen den am Prozess beteiligten Komponenten, gibt aber keine Auskunft über die Vorgänge der Auftragsabwicklung.

Parallel zum Forschungsprojekt CyProS wurden aus unterschiedlichen Domänen, wie der Intralogistik, ebenfalls Architekturkonzepte für CPS mit verschiedenen Methoden entwickelt (Lewandowski et al. 2013). Bei einer abschließenden Bewertung ist festzustellen, dass sich diese aus der Forschung kommenden Ansätze mangels Reproduzierbarkeit der Prozesse und wegen der nicht verfügbaren Entwicklungswerkzeuge in der Industrie nicht durchsetzen konnten (Leitão 2009).

In der Produktionsdomäne hat eine Vereinigung bestehend aus Verbänden, Unternehmen und Wissenschaft ein Referenzarchitekturmodell mit der Bezeichnung „Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0“ (RAMI 4.0) entwickelt. Das dreidimensionale Schichtenmodell ordnet bestehende Normen und Standards in die Bereiche Kommunikation, Lebenszyklus von Anlagen beziehungsweise Produkten sowie die Automatisierungs-Ebene ein (Heidel et al. 2017). Die bestehenden Forschungsansätze werden im Folgenden hinsichtlich der Anwendung für die Produktionsregelung von CPPS analysiert.

M. Weyrich und C. Ebert (2016) vergleichen das Schichtmodell RAMI 4.0 mit weiteren Referenzarchitekturen hinsichtlich der Flexibilität, des Anwendungsspektrums und der Benutzerfreundlichkeit. Bei dieser Untersuchung zeigt sich, dass drei weitere Modelle übereinstimmende Ansätze im Aufbau besitzen. Es sind die „Industrial Internet Reference Architecture“ (IIRA), „Internet of Things- Architecture“ (IoT-A) und „Standard for an Architectural Framework for the Internet of Things“ (IoT). Ein großer Unterschied besteht hinsichtlich der vorgegebenen Kommunikationsrichtlinien. Architekturen aus den kommerziellen Domänen nut-

3 Stand der Forschung

zen Standards wie Hypertext Transfer Protocol (HTTP) und Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). Demgegenüber steht bei RAMI 4.0 der Standard Open Platform Communications Unified Architecture (OPC UA), der sehr stark industriell geprägt ist. Eine Gemeinsamkeit aller untersuchten Modelle ist die fehlende Standardisierung im Austausch von Daten zwischen Komponenten im Netzwerk (M. Weyrich und C. Ebert 2016).

Wehberg (2017) entwickelte eine Mustererkennung für logistische Entitäten mit einer hohen Informationsrate. Über die Integration der Komponenten aus der Logistik wurden Stammdaten, Stücklisten und Arbeitspläne zur Vorhersage von Vorgängen genutzt. Im Rahmen der Arbeit wurde ein spezifisches Informationssystem aufgebaut, um die o.g. Datenquellen zu nutzen. Um den Anstieg an weiteren Informationsquellen mit komplexeren Datenstrukturen beherrschen zu können, ist eine Architektur, wie RAMI 4.0, als Grundlage für weitere Untersuchungen nötig (Wehberg 2017).

Weber et al. (2018) fokussieren sich bei ihrer Betrachtung auf die Referenzarchitekturen RAMI 4.0 und IIRA. Diese werden hinsichtlich ihrer Eignung zur Datenverarbeitung für die vernetzte Produktion gegenübergestellt. Mittels der Anforderungen von Gölzer (2017) zeigt die Bewertung bei RAMI 4.0 eine Konzentration auf Wertschöpfungsnetzwerke und bei IIRA einen Fokus im Bereich der Datenanalyse. Beide Architekturen benötigen eine Verwaltungsschale, um die Potenziale im Bereich der Produktionsregelung nutzen zu können. Die Verwaltungsschale dient dem Austausch von Informationen über standardisierte Teilmodelle (Weber et al. 2018; Gölzer 2017).

Kolberg (2019) entwickelte auf Basis des Forschungsprojektes CyProS und RAMI 4.0 eine Referenzarchitektur für die Anwendungsdomäne „Lean Production“. Hierzu wurden die spezifischen Anforderungen von „Lean-Methoden“ mittels Aktivitätsdiagrammen beschrieben, gesammelt und bewertet (Kolberg 2019). Ein weiterer Schritt definierte spezifische Datenmodelle für ausgewählte „Lean-Methoden“ und legte OPC UA als informationstechnische Schnittstelle fest. Der Austausch von Informationen zwischen der Arbeitsstation bei den Lean-Methoden mit z. B. Lager- und Montageeinheiten wurden mit einer proprietären Verwaltungsschale umgesetzt (Kolberg et al. 2017b). Die Arbeit zeigt die prinzipielle Eignung einer Verwaltungsschale hinsichtlich einer domänenspezifischen Referenzarchitektur.

3.4 Zusammenfassung und Ableitung der Anforderungen

Die Eignung einer Verwaltungsschale in der Produktion wurde in weiteren Forschungsarbeiten untersucht. Block et al. (2016) verwenden anstatt proprietärer Datenmodelle ein Agentensystem zur Kommunikation zwischen Plattformen und der Produktions-IT. Diese Arbeit beschränkt sich auf die Domäne der betriebsparallelen Materialflusssimulation und bindet noch keine realen Arbeitssysteme in das Netzwerk ein (Block et al. 2016).

Bei Willner et al. (2017) wurde ein Konzept der Verwaltungsschale prototypisch umgesetzt. Dafür werden speziell die Methoden zur Erstellung und Konfiguration der Kommunikationsmechanismen detailliert beschrieben. Die Umsetzung beinhaltet die standortübergreifende Kommunikation von mehreren Anlagen und bestätigte die Funktionsweise des Konzeptes (Willner et al. 2017). Die Autoren Langmann und Rojas-Pena (2016) zeigen in ihrer Veröffentlichung, dass dieses Konzept ebenfalls zur Vernetzung von Anlagen innerhalb eines Unternehmens angewendet werden kann (Langmann und Rojas-Pena 2016). Die Versuche zur Latenzzeit zeigten eine ausreichende Stabilität und Kommunikationsgeschwindigkeit für den Informationstausch zwischen Anlagen und Maschinen.

Ropke et al. (2016) stellen ein Konzept zur hierarchischen Anordnung von Verwaltungsschalen in der Produktion vor. Es zeigte, wie vorhandene organisatorische Strukturen einer Fertigung übernommen und in neue Ebenen eingeordnet werden können (Ropke et al. 2016).

3.4 Zusammenfassung und Ableitung der Anforderungen

Die Auswahl der in dem Kapitel Stand der Forschung vorgestellten wissenschaftlichen Arbeiten basiert auf der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit. Ausgehend von den Rahmenbedingungen wird der Stand der Technik und Forschung bezüglich Methoden zur Produktionssteuerung und -regelung sowie des Informationsmanagements dargestellt. Um einen Abgleich zwischen den vorgestellten Arbeiten und der Zielstellung durchführen zu können, werden die Anforderungen in Bewertungskriterien überführt. Tabelle 3 ordnet die relevantesten Arbeiten aus dem Stand der Forschung und Technik in die zwei Hauptkategorien Informationsmanagement und Produktionsregelung ein und bewertet sie.

3 Stand der Forschung

Tabelle 3: Bewertung der Ansätze

Anforderung/ Kriterium	Informationsmanagement							Produktionsregelung							
	Kolberg 2018	Heidel et al. 2017	Engelhardt 2015	Kropp und Schuh 2014	Pielmeier 2019	Borangiu et al. 2016	Krumeich et al. 2014	Münzberg et al. 2012	Knollmann (2014)	Knollmann und Windt 2013	Breithaupt 2001	Duffie et al. 2017	Bendul und Knollmann 2016	Dashkovskiy et al. 2011	Berger 2024
Flexibler Anwendungsbereich	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐	◐	◐	◐	◐
Berücksichtigung von CPPS	◐	◐	◐	◐	◐	●	◐	◐	○	○	○	◐	○	○	●
Fokussierung auf Produktionsregelung	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	●	●	●	◐	○	◐
Integrationsfähigkeit heterogener Anlagen	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Selektion von Ereignissen	◐	◐	●	●	●	◐	◐	◐	◐	○	◐	◐	◐	○	◐
Variabilität der logistischen Zielgrößen	◐	○	◐	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Integrationsfähigkeit in Simulationsumgebungen	○	◐	◐	◐	●	○	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Erfüllung von Echtzeitanforderungen	◐	◐	◐	◐	◐	○	◐	○	○	◐	◐	◐	◐	○	◐
Modellierung der Produktionsumgebung	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	●	●	◐	◐	●
Fähigkeit einer Prognose	○	○	○	○	◐	◐	◐	◐	○	○	○	◐	○	◐	●

Legende

- Keine Bewertung möglich
- ◐ Kriterium teilweise erfüllt
- ◑ Kriterium kaum erfüllt
- ◒ Kriterium weitestgehend erfüllt
- Kriterium erfüllt

Die zwei Hauptkategorien orientieren sich an den Forschungsfragen aus dem Abschnitt 1.2. Die erwähnten Arbeiten sind in den vorhergehenden Abschnitten jeweils aufgeführt und detailliert beschrieben.

Ausgehend von der Bewertung (vgl. Tabelle 3) der ausgewählten Arbeiten auf Grundlage der Anforderungen zeigt sich, dass derzeit kein Ansatz existiert, der die Anforderungen ausreichend erfüllt. So fehlen insbesondere Methoden für die flexible Modellierung von Produktionsressourcen, die Prognosen erlauben, sowie

Konzepte für ein Informationsmanagement zwischen CPPS und einer Produktionsregelung. Daraus abgeleitet besteht Handlungsbedarf in der Entwicklung eines Systems zur Produktionsregelung von CPPS. Die Anforderungen setzen sich aus den vier spezifischen und allgemeinen Kategorien zusammen.

Technologie und Transparenz

Ein System zur Produktionsregelung muss die hochauflösenden Daten von Arbeitssystemen in die Entscheidungsfindung einbeziehen. Unter dieser Anforderung wird verstanden, dass eine zielgerichtete Regelung von Abläufen in der Produktion mit heterogenen Anlagen ermöglicht werden muss. Mit den neuen technologischen Möglichkeiten, wie intelligenten Sensoren und CPS, lassen sich detaillierte Informationen unterschiedlicher Arbeitssysteme gewinnen. So ist es möglich, dass diese CPS ihren aktuellen Status, der über den Betriebszustand hinausgeht, kennen und diesen entsprechend gegenüber den übergeordneten Regelungssystemen kommunizieren. Mit dem Einsatz dieser Technologie kommen weitere Anforderungen als Randbedingungen hinzu. Diese sind etwa eine ereignisbasierte Kommunikation und der Datenaustausch zwischen Maschinen mit teils eingeschränkter Bandbreite zur Erfüllung der Echtzeitanforderungen. Dieser technologische Wandel ermöglicht eine höhere Transparenz der Vorgänge vom Produktionssystem bis zum Arbeitssystem bei der Auftragsabwicklung. Der Überfluss an Informationen kann zu einer Komplexitätssteigerung führen. Dies bedeutet, dass die Informationen selektiert werden müssen, um einen Nutzen aus der Technologie und der Transparenz für die Produktionsregelung zu ziehen.

Ereignisse und Verarbeitung

Die Bedeutung von Ereignissen in der Produktion wurde bereits in Abschnitt 2.3 dargestellt. Die Berücksichtigung von Ereignissen in der Produktionsregelung gewinnt in komplexeren Produktionssystemen eine immer größere Bedeutung. Eine entscheidende Anforderung ist die Erkennung und Reaktion auf aktuelle und zukünftige Ereignisse, die die Auftragsabwicklung negativ beeinflussen. Da eine allumfängliche Beschreibung und Ableitung von Regeln für unvorhersehbare Ereignisse nicht möglich ist, bedarf es Konzepten wie in der Regelungstechnik. In Abschnitt 2.5 werden der grundsätzliche Ansatz von Regelkreisen und die Unterschiede gegenüber einer Steuerung dargestellt. Im Vergleich zur Steuerungstechnik zeigt die Regelungstechnik eine höhere Flexibilität in der Verarbeitung von unvorhersehbaren Ereignissen. Die Produktionsregelung ist ein vielversprechender Ansatz hinsichtlich der Robustheit, Wandelbarkeit und Anwendbarkeit. Regelgrößen sind dabei Auftragsreihenfolge, Umlaufbestände und Rückstände. Zu den

3 Stand der Forschung

Stellgrößen zählen Kapazitäten, Auftragsprioritäten und Losgrößen des Arbeits- und Produktionssystems. Die Produktionsregelung kann einerseits unter Einsatz einer dezentralen Datenhaltung durch das intelligente Objekt selbst oder andererseits durch zentrale Regelungssysteme mit zentraler Datenhaltung gewährleistet werden. Um die Potenziale der Produktionsregelung zu nutzen, müssen die Anzahl sowie der Zeitpunkt von Ereignissen durch entsprechende Regeln definiert werden.

Modelle und Prognosen

Die zugrundeliegenden Modelle sowie Prognosemethoden müssen aufgrund stark schwankender Marktbedingungen schnell und effizient an die aktuelle Betriebssituation der Produktion und an die Arbeitssysteme anpassbar sein. Daher sollte auf den bestehenden Modellierungsgrundlagen der logistischen Kennlinien aus Abschnitt 2.4.3 aufgebaut werden. Diese Wirkmodelle bieten einen Ansatz der generischen Modellierung von Arbeitssystemen und somit ein breites Einsatzspektrum. Die Implementierung und Umsetzung der Wirkmodelle in einem Produktionsregelungssystem müssen den produktions- und informationstechnischen Echtzeitanforderungen gerecht werden. Der Abschnitt 2.5 zeigt die Möglichkeiten der regelungstechnischen Abbildung von Systemen im Bereich der Modellierung auf. Diese Verfahren aus dem Fachbereich der Regelungstechnik aufzugreifen, sind ein aussichtsreicher Ansatz für die Produktion.

Die Beschreibung von Arbeitssystemen mit regelungstechnischen Modellen eröffnet durch die mathematische Abbildung des Systems zudem die Möglichkeit, zukünftige Zustände über das gesamte Produktionssystem zu prognostizieren. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für Anpassungen von flexiblen Produktionssystemen an geänderte Auftragspektren oder neue Zielvorgaben. Zudem eröffnet die mit den Modellen mögliche Ablaufsimulation von Produktionsanlagen neue Potenziale für die Entscheidungsunterstützung in der Produktionsregelung. Durch die mathematischen Zusammenhänge wird das System formal beschreibbar und es ergeben sich Potenziale einer systemtheoretischen Untersuchung. Das daraus gewonnene Detailwissen zu Produktionsanlagen ermöglicht neue Konzepte der Produktionsregelung, um Prozesse hinsichtlich der Kenngrößen zielgerichtet zu optimieren. So können die bestehenden Kennzahlensysteme erweitert und um eine Prognose ergänzt werden.

Nach der Erläuterung der allgemeinen Entwicklungsprinzipien von Systemen (vgl. Lindemann (2007)), wie Übertragbarkeit, Skalierung sowie Transparenz, erfolgt nun die Darstellung der spezifischen Anforderungen für die vorliegende Arbeit.

Integration von inhomogenen Systemelementen

Es ist zu gewährleisten, dass die vertikale und horizontale Vernetzung der IT-Systeme und Produktionsressourcen im Unternehmen sowie über Grenzen hinweg mit standardisierten Protokollen und Strukturen ermöglicht wird. Dabei sollen die technischen Möglichkeiten im Bereich der Cloud-Infrastruktur, sofern möglich, genutzt werden. Zudem bedarf es einer Vorgehensweise zur Integration von inhomogenen Systemelementen in eine IT-Infrastruktur.

Reaktionsvermögen der Regelung auf unvorhergesehene Ereignisse

Zur Umsetzung der zentralen Aufgabe einer Produktionsregelung bedarf es einer flexiblen Auswahl der Regelgröße und der Fähigkeit, unerwartete Ereignisse zuverlässig zu detektieren. Über die Detektion hinaus muss das zu entwickelnde System die Fähigkeiten besitzen, auf unvorhersehbare Ereignisse, wie etwa Störungen oder Ausfälle an Maschinen zu reagieren. Um entsprechende Maßnahmen zu ergreifen, ist es notwendig, die Anzahl der Anlagenrückmeldungen zur Produktionsregelung zu erweitern.

Erstellen von übergreifenden Produktionsmodellen

Im Bereich der Modellierung von Produktionsvorgängen müssen definierte Elemente zur Darstellung der Vorgänge in der Fertigung festgelegt werden. Die einzelnen Modelle der Produktionsressourcen müssen untereinander verknüpfbar sein, um ein Fertigungssystem im Gesamten abzubilden. Es ist zudem erforderlich, dass diese Modelle parametrierbar sind und somit der realen Produktionsumgebung entsprechend angepasst werden können.

Prognose der Entwicklung von logistischen Zielgrößen

Die logistischen Zielgrößen sollen durch eine Prognose auf Basis der aktuellen und zukünftigen Leistungsfähigkeit der Produktionsressourcen erreicht und das Prognosewerkzeug muss Bestandteil des zu entwickelnden Systems werden. Diese Werkzeuge ergänzt das System zur Produktionsregelung und nutzt die Informationen zu den aktuellen Regelgrößen und der Modellierung.

4 Systemübersicht

4.1 Allgemeines

Das vorliegende Kapitel beschreibt das System zur Produktionsregelung von CPPS. Die Anforderungen an dieses System sind in Abschnitt 3.4 beschrieben. Das entwickelte System besteht aus vier Systemelementen, die in Abbildung 17 dargestellt sind. Das *Systemelement 1* umfasst die Architektur des Regelkreises mit einer Erweiterung der Strukturen um IT-Elemente sowie einer Erläuterung zu Kommunikationsstandards zur Rückführung von Zustands- und Produktionsereignissen. Aufbauend darauf wird das Vorgehen zur Ereignisverarbeitung in der Regelkreisstruktur in *Systemelement 2* dargestellt. Die Modellierung von Fertigungsressourcen mittels Methoden der Regelungstechnik ermöglicht im *Systemelement 3* die Betrachtung von unterschiedlichen Zielgrößen für die Produktionsregelung. Diese Modelle und Zusammenhänge kommen im Bereich der Prognose (*Systemelement 4*) der zu erwartende Vorgänge im Rahmen von Stabilitätsbetrachtungen zum Einsatz. Mit dem bestehenden Fertigungsmanagementsystem werden die Änderungen im CPPS durchgeführt. In Abbildung 17 sind die vier Elemente und deren Zusammenhang angelehnt an eine Regelung (vgl. Abbildung 13) dargestellt.

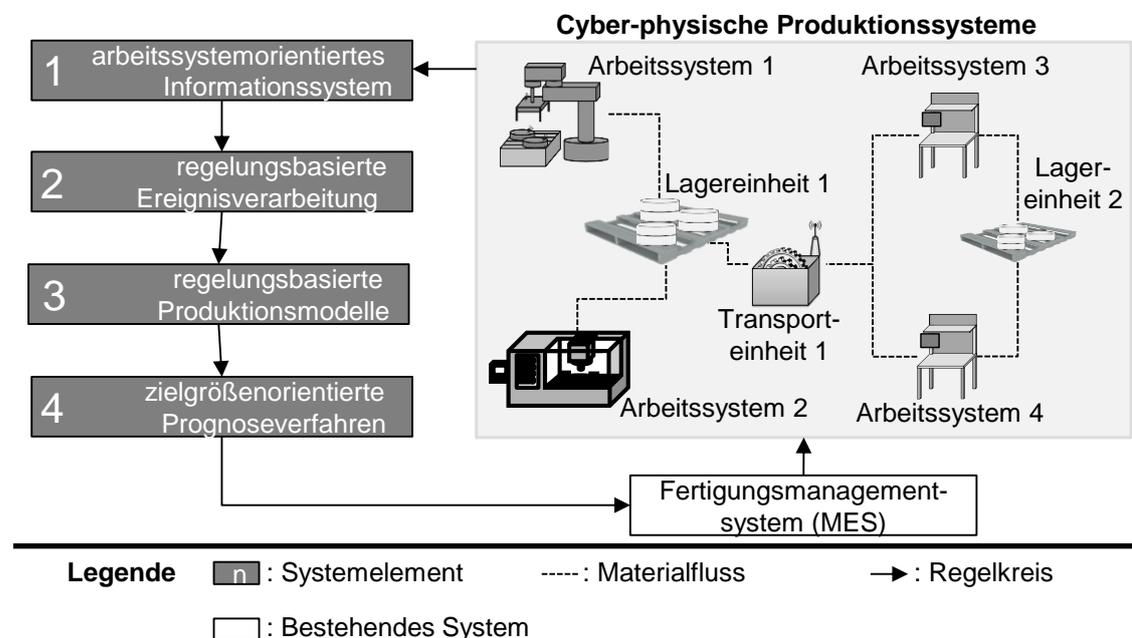


Abbildung 17: Überblick des Systems zur Produktionsregelung von CPPS

Das System zur Produktionsregelung für CPPS basiert auf dem Zusammenwirken der einzelnen Systemelemente in einem Regelkreis. Ein wichtiges Merkmal dieses Systems ist die digitale Abbildung der Produktionsvorgänge und ihrer aktuellen Zustände. Hierbei werden alle Ressourcen, die am Wertschöpfungsprozess beteiligt sind, durch einen Informationsaustausch in die Regelung einbezogen. Dazu wurden flexible Modelle entwickelt, um die Produktionsvorgänge abzubilden und miteinander zu vernetzen. Insbesondere für die Arbeitssysteme wurde ein detailliertes Modell erstellt, das den Zustand, die Leistungskennlinien sowie den Verschleiß und die Wartungsmaßnahmen abbildet. Um den aktuellen Zustand der Arbeitssysteme zu übermitteln, wurde eine spezielle Methode entwickelt, um die Ressourcen in die Systemarchitektur zu integrieren. Durch die Berücksichtigung des aktuellen Zustands der Fertigung in den Produktionsmodellen lassen sich Prognosen zur Termintreue mithilfe mathematischer Verfahren erstellen. Damit gelingt es, Aussagen zur Stabilität des Regelkreises zu treffen. Das CPPS zur Produktionsregelung entsteht durch das Zusammenspiel von Informationsübertragung und -verarbeitung.

Die Anwendung der vier Systemelemente gestattet es, alle nötigen Produktionsressourcen in die Produktionsregelung zu integrieren. Dank der Informationssysteme vernetzen sich die Produktionsressourcen in der Produktion und bilden ein CPPS. Die mit den Ereignissen gewonnenen Informationen zeigen an den Produktionsmodellen und mit dem Prognoseverfahren den Produktionsfortschritt in einer virtuellen Umgebung an. Um die Maßnahmen der Produktionsregelungen flexibler zu gestalten, werden dezentrale Regeleinheiten an jedem Arbeitssystem gebildet. Aufgrund dieser Strukturierung und Verteilung der Eingriffsmöglichkeiten können die CPS auf Abweichungen reagieren.

4.2 Systemelemente

Die vier Systemelemente werden jeweils mittels mathematischer Gleichungen und regelungstechnischer Modelle und Vorgehensweisen repräsentiert. Es folgt eine kurze Vorstellung der Systemelemente für die Produktionsregelung von CPPS. Die Kapitel fünf bis acht beschreiben umfassend die Vorgehensweise. Bei der Entwicklung der vier Systemelemente wurden die Eigenschaften eines CPS und CPPS berücksichtigt (vgl. Abschnitt 2.2).

Die Grundlage der Produktionsregelung von CPPS bildet das Systemelement *arbeitssystemorientiertes Informationssystem*. Dieses Element bildet die Basis für die informationstechnische Umsetzung, ermöglicht die Integration von CPS in ein

Fertigungssystem und wird in Kapitel 5 beschrieben. Die entwickelte Referenzarchitektur integriert die für den Produktionsprozess benötigten Entitäten und ordnet diese in unterschiedliche funktionale Ebenen ein. Zur Umsetzung der Referenzarchitektur tragen die Definition des Datenaustauschs und ein definiertes Vorgehensmodell bei. In diesem werden die Schritte zur Identifizierung der Entitäten und deren informationstechnische Weiterverarbeitung deren Daten in einer Produktionsdatenbank beschrieben.

Die *regelungsbasierte Ereignisverarbeitung* ist das zweite Element und nutzt das Informationssystem zur Übertragung der Ereignisse der Produktionsressourcen. Auf Basis der Theorie des Durchlaufelements wurde ein Vorgehen für die Ableitung des Detaillierungsgrads von Ereignissen in der Produktionsregelung entwickelt. Basis hierfür sind regelungstechnische Methoden, um die Transparenz von Produkten während der Produktion zu erhöhen. Es schließt sich die Definition dreier Regelsysteme an und die Fertigungssteuerung nach Lödding (2016) wird erweitert. Im Anschluss wird ein Maßnahmenkatalog vorgestellt, der den verschiedenen Reglertypen zugeordnet ist.

Die Abbildung der Produktion geschieht im dritten Systemelement durch *regelungsbasierte Produktionsmodelle*. Nach der Ableitung der erforderlichen Eigenschaften werden die Modelle der Produktionsressourcen in angemessener Detailtiefe gestaltet, um reale Fertigungsprozesse abzubilden. Es wurden Lager-, Arbeitssystem- und Transportmodelle entwickelt, um die Produktion wiederzugeben. Das Arbeitssystemmodell ist modular aufgebaut, um verschiedene Eigenschaften zu berücksichtigen, die zu einer Leistungsreduzierung des Arbeitssystems führen können. Die Modellentwicklung basiert auf grundlegenden Regelungstechnikprinzipien. Dadurch kann parallel zur Abbildung ein mathematisches Gleichungssystem mit regelungstechnischen Modellen des Systems erstellt werden.

Im vierten Element erfolgt die Entwicklung von *zielgrößenorientierten Prognoseverfahren* mit Hilfe regelungstechnischer Methoden. Diese basieren auf mathematischen Gleichungen. Solche Verfahren ermöglichen Aussagen über das zukünftige Verhalten des Produktionssystems und die Veränderungen der logistischen Zielgrößen. Zunächst wird eine geeignete Stabilitätstheorie, basierend auf den Anforderungen und Modellierungsmethoden, selektiert. Anschließend wird die Zielgrößenprognose mit der ausgewählten Theorie weiterentwickelt. Daraus resultiert der mathematische Beweis, dass die Methoden allgemeingültig sind. Schließlich wird die Umsetzung des Prognoseverfahrens in die Produktionsteuerung an einem Flussdiagramm erläutert.

5 Arbeitssystemorientiertes Informationssystem

5.1 Übersicht

Ein Informationssystem, das Daten zwischen Quell- und Zielsystemen in der erforderlichen Qualität und zeitgerecht austauscht, bildet die Grundlage für eine zielgerichtete Produktionsregelung. Dementsprechend verfolgt das arbeitssystemorientierte Informationssystem das Ziel, die Fertigungsressourcen mit den übergeordneten Ebenen zu vernetzen. Basierend auf dieser angestrebten Vernetzung beschreibt dieses Kapitel die Gestaltung einer Referenzarchitektur zur Produktionsregelung eines CPPS.

Zu den Bestandteilen dieser Referenzarchitektur zählen die Referenzinhalte und die Informationsübertragung. Die Referenzinhalte repräsentieren die Beschreibung der Architekturelemente oder Informationsobjekte und deren strukturierte Anordnung. Darüber hinaus erfolgt die Definition von Kommunikationstypen und den Produktionsdaten. Das Vorgehensmodell beschreibt, auf welche Art und Weise die Referenzarchitektur in der Praxis angewendet wird.

5.2 Referenzarchitektur für die modellbasierte Produktionsregelung

5.2.1 Allgemeines

Eine allgemeine Definition für eine Referenzarchitektur ist, dass diese Architektur in einer bestimmten Domäne die Architekturelemente, Komponenten oder Informationsobjekte mit deren strukturierter Anordnung und deren Beziehung beschreibt. Ferner enthält sie nach Möglichkeit eine Musterlösung für die definierte Aufgabenstellung (Krcmar 2016; Haberfellner 2015; Goll 2014). In Abbildung 18 ist ein Muster für eine Referenzarchitektur zur Produktionsregelung von CPPS für eine hybride hierarchische Struktur dargestellt.

Die Notwendigkeit der Entwicklung einer Referenzarchitektur für die Produktionsregelung von CPPS resultiert aus der notwendigen Beschreibung von Ressourcen auf den verschiedenen Ebenen und der Festlegung der Informationsflüsse.

5 Arbeitssystemorientiertes Informationssystem

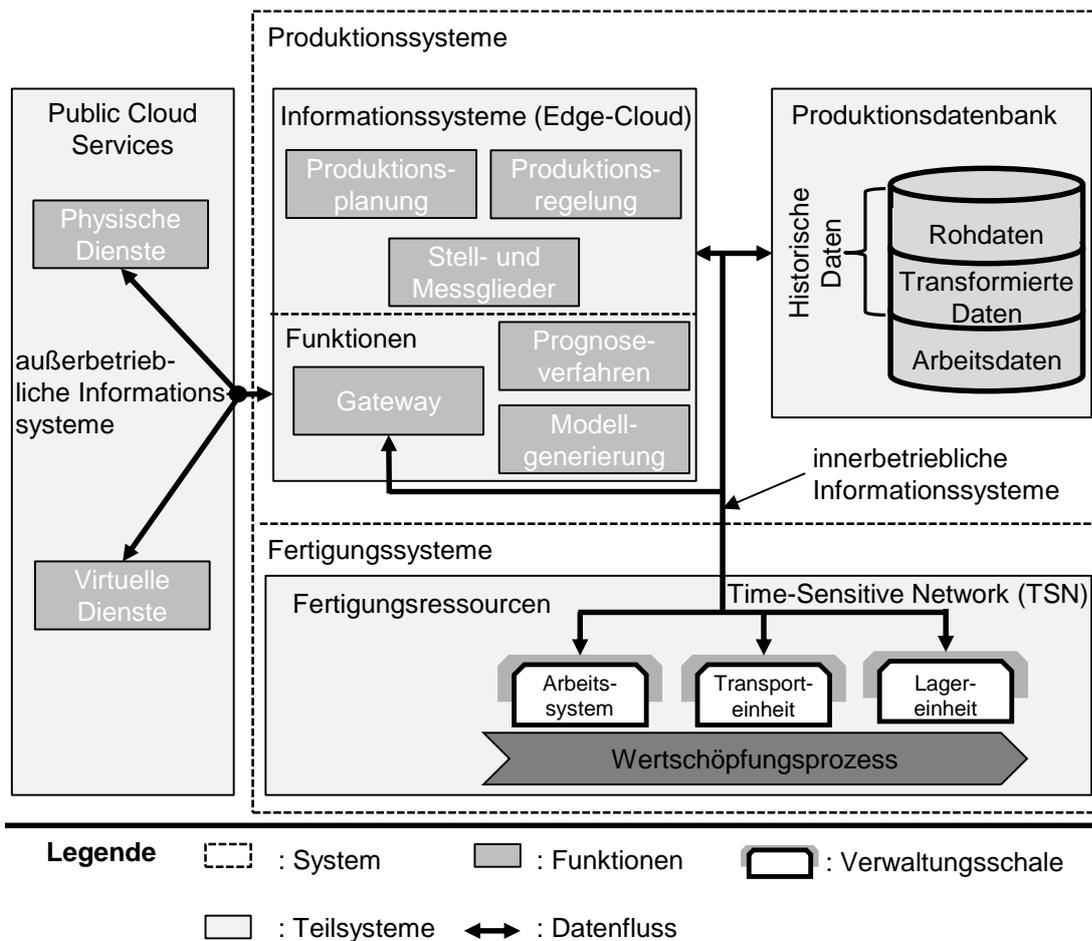


Abbildung 18: Referenzarchitektur einer Produktionsregelung

Die vorliegende Referenzarchitektur ist unabhängig von unternehmensspezifischen Softwarelösungen und folgt stattdessen aktuellen Normen und Standards, wie VDI 5600, DIN SPEC 91329, DIN SPEC 91329 und DIN SPEC 92222. So lässt sich eine hinreichende Allgemeingültigkeit der Referenzarchitektur sicherstellen. In den folgenden Abschnitten werden die funktionalen Zusammenhänge zwischen den Entitäten zur Bearbeitung der Produktionsaufträge erläutert.

5.2.2 Public Cloud Services

Wie in Abbildung 18 dargestellt, gibt es zwischen den innerbetrieblichen Informationssystemen und den außerbetrieblichen Public Cloud Services einen bidirektionalen Informationsfluss. Dabei werden die Public Cloud Services über das öffentliche Internet bereitgestellt. Die Abbildung 19 veranschaulicht die unterschiedlichen Typen von Funktionen der Public Cloud Services sowie deren Ein- und Ausgangsdaten.

5.2 Referenzarchitektur für die modellbasierte Produktionsregelung

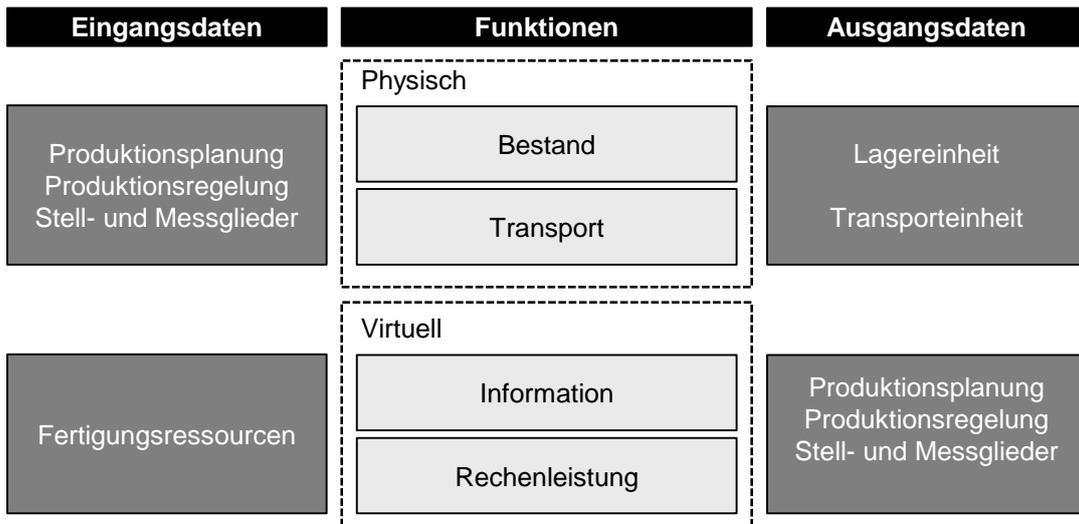


Abbildung 19: Funktionen der Public Cloud Services

Die physischen Funktionen, wie der Transport, die Lagerung und die Bereitstellung von Materialien dienen der Aufrechterhaltung des betrieblichen Wertschöpfungsprozesses. Die Auslagerung dieser Funktionen, die mit einer Berechnung sowie einem Austausch von Informationen mit Dritten einhergeht, begünstigt eine Flexibilisierung und Optimierung der Produktion (Martin 2016; Rushton et al. 2014). Zur Nutzung von externen Dienstleistern ist eine stabile informationstechnische Kopplung der Funktionseinheiten nötig. Angaben über benötigte Lagermengen und Transporttermine werden durch die Produktionsplanung grob vorherbestimmt und flexibel durch die Produktionsregelung veranlasst.

Die virtuellen Funktionen umfassen Informationsquellen von Fertigungsressourcen. So können beispielsweise aktuelle Informationen über den Zustand der genutzten Arbeitssysteme und Werkzeuge bei Bedarf übermittelt werden. Hierzu ist ein Informationsfluss aus der Ebene der Fertigungsressourcen zu den Public Cloud Services über das Gateway zu gewährleisten. Mit dieser Architekturgestaltung können CPS eine dezentrale bidirektionale Datenverarbeitung vornehmen.

Ein weiterer Aspekt stellt die extern skalierbare Rechenleistung dar. Daten können zur Berechnung und Analyse ausgelagert und das Ergebnis kann in den Informationssystemen weiterverarbeitet werden. Diese Funktion lässt sich aus beliebigen Entitäten des Produktions- und Fertigungssystems nutzen. Voraussetzung ist die Unterstützung der technischen Gegebenheiten hinsichtlich von Protokollen und Datenmodellen.

Zur informationstechnischen Anbindung an die innerbetrieblichen Informationssysteme und Fertigungsressourcen mit Public Cloud Services sind entsprechende

Protokolle notwendig. Aufgrund der wechselnden Anzahl und heterogenen Teilnehmer auf der Feldebene bietet sich eine plattformunabhängige Realisierung an. Der Kommunikationsstandard OPC UA mit dem Publish/Subscribe-Modell ist eine Möglichkeit der Umsetzung zur außerbetrieblichen Kommunikation (Hoppe 2014). Bei diesem Kommunikationsmodell sendet ein Server seine Daten in das Netzwerk (Publish) und jeder Client in der Public Cloud kann diese Daten empfangen (Subscribe). Das OPC UA Publish/Subscribe-Modell ermöglicht einen interoperablen Informationsfluss mit wechselnden Teilnehmern innerhalb der Referenzarchitektur (Mersch et al. 2017; Perez et al. 2015). Mit Netzwerkprotokollen, wie beispielsweise Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) oder Advanced Message Queuing Protocol (AMQP), lassen sich Teilnehmer an Rechenzentren sowie Hersteller über das öffentliche Netzwerk anbinden (DIN SPEC 92222). Diese Kommunikationsprotokolle besitzen eine niedrige Latenzzeit von weniger als 30 Sekunden und bieten daher die Möglichkeit, externe Rechenkapazitäten zu nutzen (Stangl et al. 2016).

5.2.3 Informationssysteme

Die technische Basis der Informationssysteme bildet eine Edge-Cloud (vgl. Abbildung 18). Gemäß Abbildung 20 beinhaltet dieses System die Produktionssoftware und weitere Funktionen zur Datenverarbeitung sowie die Kommunikation mit Public Cloud Services.

Die hierarchische Beziehung der drei produktionsspezifischen Funktionen Produktionsplanung, -regelung und die Stell- und Messglieder basiert auf der zeitlichen Inanspruchnahme der Funktionen während der Produktionsregelung eines CPPS. Auf der Ebene der Produktionsplanung werden Informationen zum Fertigstellungstermin des Auftrags, zu den Arbeitsvorgängen (AVO), zu den benötigten Fertigungsressourcen und den initialen Parametern für die Modelle der Produktionsregelung zu Verfügung gestellt (vgl. Abschnitt 2.4.4). Die Funktionen der Produktionsregelung bilden den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit. Diese Funktionen (vgl. Abbildung 18) besitzen Schnittstellen zu den Public Cloud Services, zur Produktionsplanung sowie zu den Stell- und Messgliedern der Fertigungsebene. Die Schnittstellen sind nötig, um die Grundfunktionen der Produktionsregelung von CPPS, wie der Verschlüsselung oder Erweiterung einer Produktionsregelung auf Basis von CPS zu gewährleisten (vgl. Abschnitt 2.4.5). Diese Grundfunktionen werden im Zuge der Produktionsregelung um die zwei Funktionen Modellgenerierung und Prognose erweitert.

5.2 Referenzarchitektur für die modellbasierte Produktionsregelung

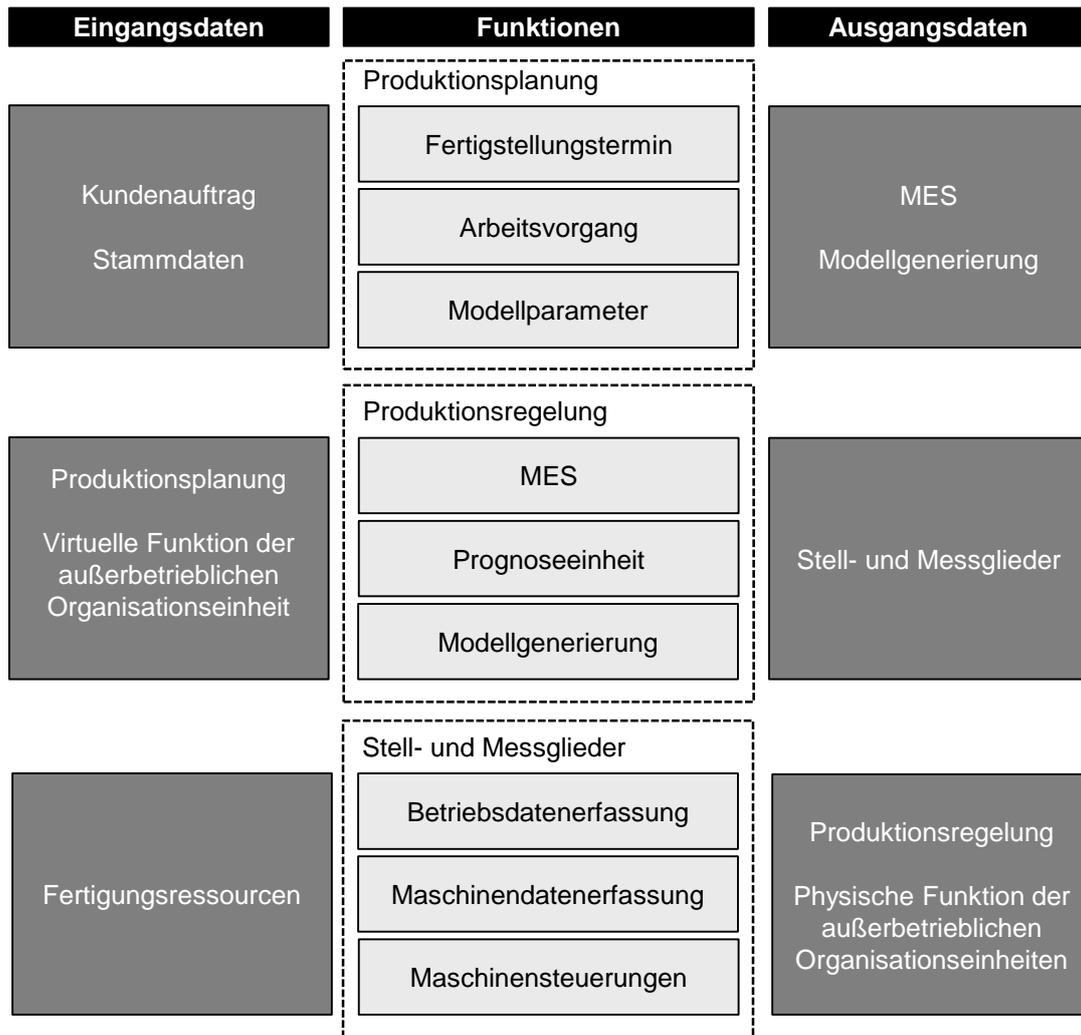


Abbildung 20: Funktionen der Informationssysteme

Die Prognosefunktion für die aktuell in der Produktion befindlichen Aufträge ist notwendig, um gezielte und geeignete Maßnahmen während des Fertigungsablaufes vornehmen und so die Termintreue sicherstellen zu können.

Werden ausschließlich ungefilterte Ist-Werte des Fertigungsablaufes zur Produktionsregelung genutzt, häufen sich unnötige Eingriffe in den Wertschöpfungsprozess. Diese Eingriffe in den Prozess führen zu einer „Unruhe“ und reduzieren das Vertrauen des Betreibers in die Produktionsregelung (Westkämper 2009; Wolf 1987). Zur Reduzierung der Regelungseingriffe wird ein Abbild der aktuellen und erwarteten Zustände der CPS-basierten Arbeitssysteme erstellt, auf dessen Basis die Termintreue der Aufträge prognostiziert wird. Hierzu werden die Ist-Werte des Fertigungsablaufes nur zu bestimmten Zeiten und nicht kontinuierlich abgerufen.

Grundlage für die Regelung sind auftragspezifische Daten. Diese stellt die Produktionsplanung bereit, so dass sie den Modellen Arbeitssysteme, Lager- und

Transporteinheiten zur Verfügung stehen. Durch die Schnittstelle zwischen den Modellen zu den Stell- und Messgliedern werden die aktuellen Ist-Zustände des Produktionsfortschrittes in die Modelle übernommen.

Die dritte Ebene der Informationssysteme stellen die Stell- und Messglieder dar. Diese Informationssysteme bilden die Schnittstelle zum Wertschöpfungsprozess. Im Sinne einer Regelung sind diese Systeme als Stell- und Messglieder zu verstehen (vgl. Abschnitt 2.5.2). Die getroffenen Maßnahmen in der Produktionsregelung, wie beispielweise eine Änderung der Produktionsreihenfolge oder Reduzierung der Losgröße, werden durch die Stellglieder angestoßen. Dies kann mittels Informationsübertragung direkt in die Steuerungseinheiten der Fertigungsressourcen, an die MDE oder mittels Anzeigen an einer BDE für einen Werker erfolgen. Der Erfolg des Eingriffes in den Fertigungsablauf wird mit den Messgliedern auf Basis von Ereignissen zurückgemeldet (vgl. Abschnitt 2.3).

Das Informationssystem erfüllt zudem die Funktionalität eines Gateways zur externen Kommunikation. Die Edge-Cloud verbindet die unternehmensinterne Produktions-IT mit der externen Netzinfrastruktur (Aazam und Huh 2014). Das Gateway erfüllt dabei die Funktionen eines Filters und das Monitoring der Daten für die externe Nutzung aus der Produktion. Darüber hinaus kann eine Vorverarbeitung der Daten aus den Fertigungsressourcen vorgenommen werden. Dies reduziert die nötige Datengröße, reduziert den Bandbreitenbedarf und erhöht die Qualität der Informationen. Zuletzt ist die Nutzung des Gateways auch eine Maßnahme zur Erhöhung der IT-Sicherheit (Chang et al. 2014).

5.2.4 Fertigungsressourcen

Die technischen Fertigungsressourcen auf der untersten Ebene sind physische Betriebsmittel, die unmittelbar am Wertschöpfungsprozess beteiligt sind. Im Fokus dieser Arbeit zählen hierzu Arbeitssysteme, Transport- und Lagereinheiten. Diese drei grundlegenden Elemente eines Produktionsprozesses sind zur logischen Beschreibung sowie zur Modellierung ausreichend (Nyhuis und Wiendahl 2012; Kuhn 1995a).

Bei einem Arbeitssystem handelt es sich um einen oder mehrere technische Prozesse, deren Produktionskapazität sich mit den Parametern Produktionsleistung und Bestand beschreiben lässt. Ein Arbeitssystem kann aus mehreren Prozessschritten wie Bohren, Entgraten und Beschriften bestehen, sofern diese Schritte einem gemeinsamen Bestand zugeordnet werden können (vgl. Abbildung 21).

5.2 Referenzarchitektur für die modellbasierte Produktionsregelung

Ressourcen mit mehreren Prozessschritten ergeben somit ein Arbeitssystem. Der nötige Bestand wird in den Lagereinheiten erfasst und mittels Transporteinheiten zu weiteren Stationen transportiert (Lödding 2016). In Abbildung 21 ist beispielhaft die Aufteilung der Ressourcen entlang eines Wertschöpfungsprozesses dargestellt.

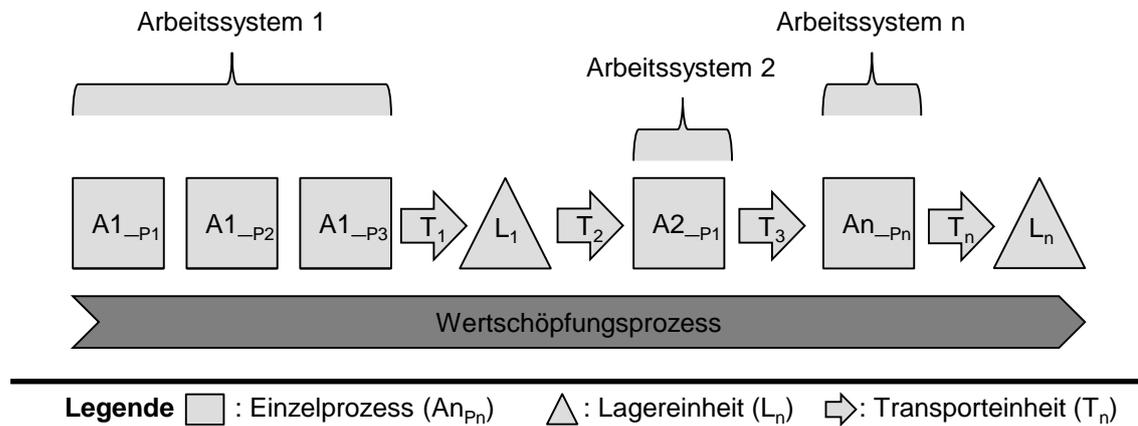


Abbildung 21: Schematische Darstellung von Arbeitssystemen

Zur informationstechnischen Anbindung der Fertigungsressourcen an die übergeordneten Ebenen kommt ebenso OPC UA auf Grund der hohen Verbreitung zum Einsatz. Eine Implementierung als Server-Client-Modell ist darüber hinaus aus Gründen der Robustheit, Echtzeitfähigkeit und Übertragungssicherheit sinnvoll (Mersch et al. 2017; Schleipen 2013). Zur Gewährleistung der Echtzeitfähigkeit kommt das Interoperable TSN (Time-Sensitive Network) mit einer Latenzzeit > 1 ms zum Einsatz (M. H. Farzaneh und A. Knoll 2017; Kirrmann et al. 2009). Für die Kommunikation auf der Produktionsebene ist diese Latenzzeit ausreichend (Kletti und Schumacher 2011). Mit dieser IT-Infrastruktur können CPS in Form von z. B. Lagereinheiten Informationen über den Lagerbestand bzw. den Transportstatus an die Produktionsregelung übertragen.

5.2.5 Produktionsdatenbank

In der plattformunabhängigen Produktionsdatenbank erfolgt die Speicherung und Verwaltung von Stamm-, Personal-, Material- und Ressourcendaten, die von allen internen Informationssystemen und Fertigungsressourcen über unterschiedliche Schnittstellen genutzt werden. Diese aggregierten Informationen, wie Arbeitspläne mit den spezifischen Zeiten je Arbeitsvorgang und benötigten Kapazitäten der Arbeitssysteme, werden in der Produktionsdatenbank zentral gespeichert. So stehen

Informationen über den Produktionsfortschritt und die Zustände der Fertigungsressourcen allen Entitäten in dem Produktionsnetzwerk zur Verfügung. Dies erhöht den Nutzen der gesammelten Daten (Vallhagen et al. 2017; Häckelmann et al. 2000).

Die zentrale Datenbank ist in die drei Sektoren *Arbeitsdaten*, *transformierte Daten* und *Rohdaten* unterteilt (vgl. Abbildung 18). In dieser Ausführung ist ein zielgerichteter Zugriff auf die Produktionsdaten gewährleistet (Weber et al. 2018). Die *Arbeitsdaten* sind u. a. die aktuellen Zustände und Informationen der Fertigungsressourcen von Beginn bis zum Ende jedes Arbeitsauftrages. Nach der Beendigung des Auftrags kommt es zur Transformation und Speicherung der Daten für Langzeitanalysen. Mit der Speicherung der *Rohdaten*, zugeordnet zu Arbeitsvorgängen und Ereignissen, lassen sich weiterführende Analysen durchführen.

Als relationale Datenbanken können die strukturierten Daten der Fertigungsmodelle und der Bewegungsdaten der Aufträge in allen drei Sektoren abgebildet werden. Die Produktionsdatenbank fungiert als zentrales Element zur Verwaltung der Daten aus den vorhandenen Systemen und Einheiten.

5.2.6 Informationsübermittlung

Durch die Definition der Aufgaben und die Ausgestaltung der Entitäten in der Referenzarchitektur werden die vier Arten der Informationsübermittlung von Fertigungsressourcen an ein übergeordnetes System in Anlehnung an die Arbeit von Al-Fuqaha et al. (2015) definiert (vgl. Abbildung 22).

Dies stellt ein Rahmenwerk für die spätere Implementierung unterschiedlicher Typen von Nachrichten innerhalb der Referenzarchitektur dar (vgl. Abschnitt 5.2.1) (Fleischmann et al. 2018; 24582). Im Folgenden werden die vier Arten der Informationsübermittlung beschrieben.

Der Kommunikationstyp *Telemetrie* kommt bei der Übermittlung der Rohdaten von Fertigungsressourcen zur Produktionsdatenbank zum Einsatz. Dabei handelt es sich um einen kontinuierlichen Informationsfluss von Energie-, Maschinen- und Prozessdaten der CPS (vgl. Abschnitt 6.2).

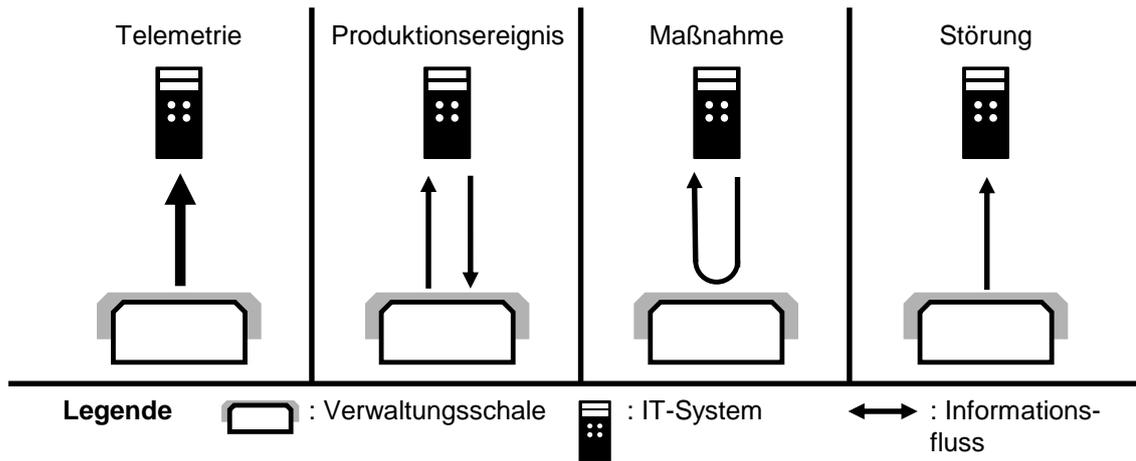


Abbildung 22: Grundlegende Arten Informationsübermittlung in der Referenzarchitektur in Anlehnung an DIN SPEC 92222

Nachrichten des Typs *Produktionsereignis* enthalten Informationen von Ereignissen aus der Produktionsabwicklung. Hierbei handelt es sich um Meldungen über die Auftragsabwicklung, wie Start- und Endzeiten von Aufträgen, sowie aktuelle Parameter für die Prognose. Die Anfrage nach diesen Informationen wird von der Produktionsregelung ausgelöst.

Der Nachrichtentyp *Maßnahme* bezeichnet Eingriffe der Produktionsregelung in den geplanten Ablauf (vgl. Abschnitt 6.2.4). Nachdem eine Maßnahme durchgeführt wurde und abgeschlossen ist, wird dies mit einer entsprechenden Nachricht quittiert.

Die Inhalte des Nachrichtentyps *Störung* sind unvorhergesehene Ereignisse in der Produktion (vgl. Abschnitt 2.3.3). Inhalte der Übertragung sind Störungsgrund, Ressource und spezifische Parameter. Nachrichten dieses Typs werden u. a. direkt in der Produktionsregelung für die Prognose genutzt (vgl. Abschnitt 6.2.2).

5.3 Vorgehensmodell

5.3.1 Allgemeines

Zur Vervollständigung der Referenzarchitektur wird an dieser Stelle ein Vorgehensmodell zur Integration der Produktionsressourcen in die Architektur definiert. Mit diesem Vorgehen kann sichergestellt werden, dass alle Elemente einer Produktion in der Produktionsregelung von CPPS abgebildet werden. Zur Darstellung

des Vorgehensmodells bietet sich die Darstellung gemäß der Business Process Model and Notation (BPMN) an (Suri et al. 2017). Die grafische BPM-Notation stellt den Sequenzfluss bei dem Vorgehen abstrakt dar und ermöglicht es auch, den Informationsfluss abzubilden. Durch diese Kombination der Darstellungsmöglichkeiten findet die BPM-Notation eine hohe Akzeptanz in der Softwaretechnik und bei der Abbildung von Ablaufbeschreibungen (I. Graja et al. 2017; Picard 2015; Fischermanns 2013).

5.3.2 Ablaufdiagramm

Das in Abbildung 23 dargestellte Ablaufdiagramm veranschaulicht den gesamten Prozess zur Integration der teilnehmenden Entitäten in der Referenzarchitektur für CPS in der Produktionsregelung.

Mit der erstmaligen Initialisierung der Produktionsregelung oder der Integration neuer CPS in die Produktionsregelung wird der Prozessablauf gestartet. Bei *Start* erfolgt als erster Schritt die Identifizierung der Fertigungsressourcen (vgl. Abschnitt 5.2.4) in den Grenzen der von der Produktionsregelung beeinflussbaren Produktion. Dabei werden zuerst die *Lagereinheiten* und *Transporteinheiten* aufgenommen. Diese parallelen Prozessschritte enden nach der Bestimmung aller Elemente der beiden Ressourcenarten. Darauf folgt die Bestimmung der *Arbeitssysteme*, die iterativ durchlaufen werden, da teilweise Arbeitssysteme zusammengefasst werden können. Jedem Arbeitssystem werden hierbei eine Leistung und ein Bestand zugeordnet. Ist dies nicht möglich, kommt es zu einer Verdichtung des Arbeitssystems (Nyhuis und Wiendahl 2012). Im iterativen Prozess werden zwei oder mehr Arbeitssysteme zu einem übergeordneten Arbeitssystem zusammengeführt, bis eine spezifische Zuordnung von Bestand und Leistung erreicht wird.

Sobald die Identifizierung der Fertigungsressourcen abgeschlossen ist, erfolgt ein Eintrag in die *Produktionsdatenbank*. Nach diesem Eintrag der Fertigungsressourcen in die *Produktionsdatenbank* wird automatisch der Prozessschritt *Datenbearbeitung* ausgelöst. Dies ermöglicht eine manuelle Aufbereitung der abgelegten Informationen, um nicht identifizierbare Entitäten einzutragen.

In der zweiten Ebene *Informationssysteme* kommt es zur parallelen Identifizierung von IT-Systemen, wie der *Produktionsplanung*, der *Produktionsregelung* oder der *Stell- und Messsysteme* der Produktion.

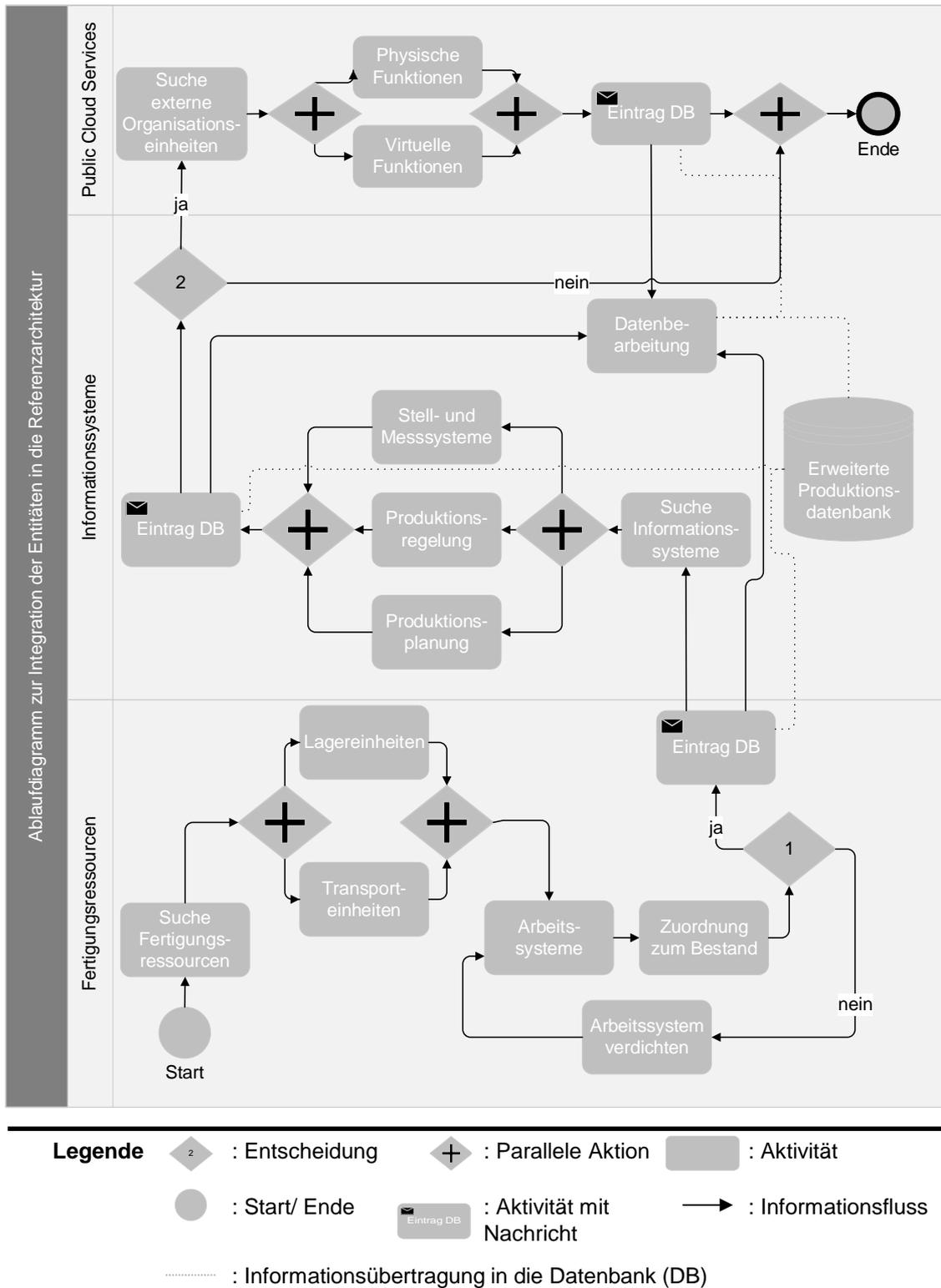


Abbildung 23: Ablaufdiagramm zur Integration eines CPS in die Referenzarchitektur für eine Produktionsregelung

Dieser Vorgang endet ebenfalls mit Übermittlung der Systeme in die *Produktionsdatenbank*. Im Anschluss kann entweder die Suche nach *externen Organisationseinheiten* durchgeführt oder der Ablauf direkt beendet werden. Die Schnittstelle zu *externen Organisationseinheiten* ist eine Vorkehrung, um externe Dienstleistungen von z. B. Maschinenherstellern oder externe Softwaredienstleistungen zu integrieren.

Die Identifizierung der Public Cloud Services auf der dritten Ebene findet in einer parallelen Abfolge statt. Nach der Beendigung dieses Prozessschritts erfolgt der Eintrag in die Datenbank und der Ablaufprozess ist zu *Ende*. Nach Abschluss der Identifizierung der Ressourcen sind in der erweiterten Produktionsdatenbank alle relevanten Entitäten zur Durchführung des Produktionsprozesses erfasst. Sollten Ressourcen fehlen, können diese manuell ergänzt werden.

5.4 Fazit

In diesem Kapitel wurde mit der Referenzarchitektur eine informationstechnische Grundlage für die Implementierung der Produktionsregelung für CPPS entwickelt. Basis ist eine Beschreibung der Grundelemente der Architektur (vgl. Abschnitt 5.2); im Weiteren erfolgt die Ableitung der Informationsübermittlung. Die entwickelte Vorgehensweise zur Implementierung der Referenzarchitektur wird im letzten Abschnitt 5.3 vorgestellt.

Die Struktur der Referenzarchitektur besteht aus drei Ebenen, auf denen sich die Entitäten für die Auftragsabwicklung einordnen. Es erfolgt eine Beschreibung der jeweiligen Aufgaben und Rollen der einzelnen Systeme sowie deren informationstechnische Beziehung zueinander. Die zum Informationsaustausch nötigen Methoden und Protokolle werden auf den einzelnen Ebenen ausgeführt. Zusätzlich wird der Inhalt des Informationsaustauschs anhand von drei Datenmodellen definiert und beschrieben. Ein Teil dieser Beschreibung umfasst die Ausprägungen des Informationsaustauschs zwischen der Fertigungsressource und einem übergeordneten System. Ausgehend von den Fertigungsressourcen wird ein Vorgehensmodell zur Implementierung einer Produktionsregelung von CPPS definiert.

Auf Basis der entwickelten Referenzarchitektur kann die Integration einer Produktionsregelung für CPPS vorgenommen werden. Diese ist unabhängig von einer konkreten Umsetzung und somit übertragbar.

6 Regelungsbasierte Ereignisverarbeitung

6.1 Übersicht

Im zweiten Systemelement wird aufbauend auf der Referenzarchitektur die Verarbeitung der Ereignisse mithilfe der Regelungsstrukturen erläutert. Zur Veranschaulichung der Regelungsstrukturen zeigt der folgende Abschnitt die Struktur und die Wirkmechanismen. Ein weiterer Schritt erläutert die gezielte Generierung von Ereignissen von Produktionsressourcen und deren Verarbeitung in der Produktionsregelung. Dazu wird auf Grundlage des Durchlaufelements eine Definition von Rückmeldungen zu geplanten Produktionsereignissen festgelegt.

Die Fertigungssteuerung von Lödding (2016) ist die Grundlage der Implementierung der Regelkreise zur Ereignisverarbeitung. Sie wird in diesem Kapitel vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Regelungsstrukturen und ihre mögliche Verkettung in Kaskaden für die drei Zielgrößen aufgezeigt. Dies gilt auch für die Umsetzung der Regeleinheiten.

6.2 Entwicklung einer Produktionsregelung

6.2.1 Allgemeines

Das entscheidende Merkmal der Produktionsregelung gegenüber einer Produktionssteuerung ist der geschlossene Regelkreis (vgl. Abschnitt 2.5). Ein geschlossener Produktionsregelkreis benötigt die folgenden vier Bestandteile:

- Der *Regler* beeinflusst den Zu- und Abgang eines Arbeitssystems sowie die Reihenfolge der Aufträge.
- Die *Regelstrecke* bildet den Teil der wertschöpfenden Arbeitssysteme in einer Produktion ab.
- Die *Regelgröße* ist eine Vorgabe zur Zielgröße des übergeordneten Systems.
- Die *Rückmeldungen* mittels Messeinrichtungen dienen der laufenden Erfassung des Produktionsfortschritts eines Arbeitssystems und geben den Ist-Zustand wieder.

6 Regelungsbasierte Ereignisverarbeitung

Aus diesen vier Systemelementen lässt sich eine Regelung für ein Arbeitssystem aufbauen. Diese Regelung bezieht sich ausschließlich auf Maßnahmen im Kontext der Auftragsabwicklung und nimmt keinen Einfluss auf interne Regelkreise einer Maschine, wie z. B. die Durchführung eines Fräsprozesses.

Die Fertigung von Produkten und Bauteilen setzt sich bei der Mehrzahl von Unternehmen aus mehreren Anlagen und Maschinen zusammen. Gemäß der Definition aus Abschnitt 2.2 entspricht dieses innerbetriebliche System von Produktionsanlagen einem CPPS. Daraus abgeleitet entspricht eine einzelne Anlage einem CPS, welches in der vorliegenden Arbeit aus den drei folgenden Aspekten besteht:

- Das Arbeitssystem erfüllt die Definition gemäß Abschnitt 5.2.4.
- Jedes Arbeitssystem besitzt eine Verwaltungsschale (vgl. Abschnitt 2.2) oder kann die erforderlichen Maschinenzustände kommunizieren.
- Ein Arbeitssystem kann dezentrale regelnde Maßnahmen einleiten.

Eine Produktion besteht aus mehreren dezentral regelbaren Systemen. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Struktur, das Zusammenwirken der einzelnen CPS und die Produktionsregelung.

6.2.2 Generierung von Ereignisketten von Arbeitssystemen

Grundlage einer Produktionsregelung ist die Generierung der Ereignisse während der Auftragsproduktion. Darüber lässt sich der zeitliche und logisch-kausale Fertigungsablauf beschreiben, um diesen gezielt zu regeln (Kruse und Scheer 1995). Dazu ist es notwendig, dass Ereignisse den Zeitpunkt, an dem das Eintreten eines definierten Zustandes markiert wird, an das regelnde System melden (DIN 69900). Der Fertigungsprozess lässt sich gemäß dieser Definition auf eine Folge von Ereignissen reduzieren. Diese lassen sich weiterhin in die drei Ereigniskategorien

1. Störungsereignis (SE),
2. geplantes Ereignis (GE) und
3. prozesstechnisches Ereignis (PE)

unterteilen (vgl. Abschnitt 2.3) (Engelhardt 2015). Die Ereignisse der Kategorien 1 und 2 werden unmittelbar nach dem Auftreten an übergeordnete Systeme kommuniziert (Schulz 2018). So können SE unmittelbar in der Produktionsregelung berücksichtigt werden. Im Weiteren können die GE, wie Produktionsstart und -ende, mit den Bewegungsdaten in der Produktionsdatenbank abgeglichen werden

(Kuyumcu 2013). Zur Erhöhung der Transparenz während der Bearbeitungsschritte sind weitere PE notwendig. Zur Modellierung des zeitlichen Verhaltens der Bearbeitungsschritte ist die Bestimmung des Detaillierungsgrads bzw. die Anzahl der Ereignisse von hoher Bedeutung (Noack 2001; Kruse und Scheer 1995). Wenn der Detaillierungsgrad aufgrund einer hohen Anzahl von Ereignissen zu groß ist, entsteht ein unnötiger Aufwand bei der Speicherung in der Produktionsdatenbank sowie ein hoher Kommunikations- und Auswertungsaufwand. (Klein 2018; Münnich und Zwick 2016). Zur Definition der nötigen Anzahl an PE können Methoden aus der Regelungs- und Produktionstechnik dienen.

Die Bestimmung des nötigen Detaillierungsgrads für die Produktionsregelung von CPPS basiert auf dem Durchlaufelement (Nyhuis und Wiendahl 2012) und dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem (vgl. Abschnitt 2.5.3) (Lunze 2014). Mit dem Abtasttheorem lässt sich die Abtastrate für die Produktionsregelung methodisch auf Basis eines fundierten Vorgehens bestimmen (Kletti und Schumacher 2011; Unbehauen 2008). Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem besagt, dass die Abtastrate an der Messstelle doppelt so hoch wie die möglichen Regelmaßnahmen sein muss. Die in der Produktionsregelung vorgesehenen Maßnahmen (vgl. Abschnitt 6.4) können nicht direkt in einen Produktionsprozessschritt, wie z. B. in den Dreh- oder Polierprozess, eingreifen bzw. diesen verändern (Sihn et al. 2016). Die formulierten Maßnahmen greifen erst nach Abschluss der jeweiligen Prozesse.

Das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem wird angewendet, um die Ereigniskette zwischen dem Start und dem Ende eines Arbeitsschrittes im Durchlaufelement gezielt mittels PE zu erweitern. Dafür wird der Faktor zwei in den folgenden Formeln (7 - 9) eingeführt. Die Durchführungszeiten in den fünf Teilschritten des Durchlaufelements sind nicht standardisiert und somit inhomogen (vgl. Abschnitt 2.4.2). Zur Produktionsregelung sind weitere Produktionsereignisse erforderlich, um präzise Regelungsmaßnahmen treffen zu können. Das Auslösen der prozesstechnischen Ereignisse durch die jeweiligen Fertigungsressourcen erfolgt auf Basis der berechneten Abtastrate der Produktionsregelung.

Die Abtastfrequenz basiert auf der Randbedingung, dass die minimale Anzahl der nötigen Produktionsereignisse zur Produktionsregelung herangezogen werden soll. Es gelten dabei die Formeln (7 - 9) zur Berechnung der Abtastfrequenz der Bearbeitungsvorgänge (*BVO*), Arbeitsvorgänge (*AVO*) und Bearbeitungsschritte (*BVS*).

6 Regelungsbasierte Ereignisverarbeitung

$$f_{BVO} = \frac{1}{\text{Bearbeitungsvorgang} * 2} \quad (7)$$

$$f_{AVO} = \frac{1}{\text{Arbeitsvorgang} * 2} \quad (8)$$

$$f_{BVS} = \frac{1}{\text{Bearbeitungsschritt} * 2} \quad (9)$$

Aus diesem Vorgehen ergeben sich zusätzliche PE im Fertigungsprozess. In der *Abbildung 24* sind die beschriebenen Ereignisse eines Durchlaufelements beispielhaft dargestellt.

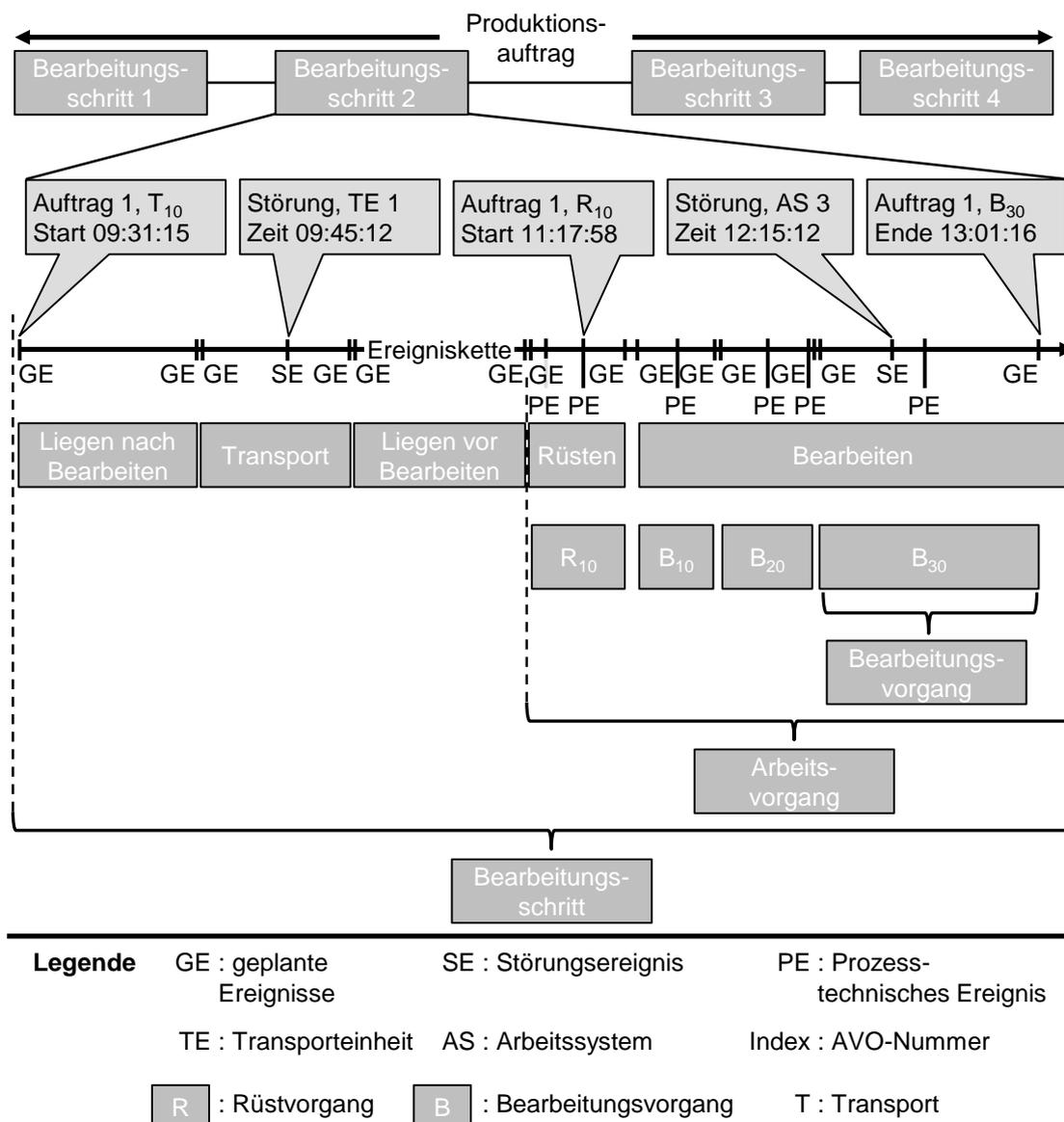


Abbildung 24: Darstellung der beispielhaften Erweiterung des Durchlaufelements

6.2 Entwicklung einer Produktionsregelung

Die Rückmeldungen aus dem beispielhaften Durchlaufelement eines CPS, wie dem Arbeitssystem 3 (AS 3) zu der übergeordneten Produktionsregelung, sind in Tabelle 4 dargestellt. ID 0002 und ID 0019 sind Ereignisse, die aufgrund der definierten Abtastfrequenz (siehe Formeln (7 - 9)) gesendet werden. Dadurch ergibt sich eine Erhöhung der Auflösung in den Produktionsvorgängen.

Tabelle 4: Aufbau der Ereigniskette, in Anlehnung an DIN SPEC 91329

Rückmeldungen				
ID	Arbeits- system ID	AVO	Ereignis	Zeit- stempel
0001	AS 3	R ₁₀	GE: Rüstvorgang gestartet	11:12:58
0002	AS 3	R ₁₀	PE: Rüstvorgang R ₁₀ aktiv	11:17:58
0003	AS 3	R ₁₀	GE: Rüstvorgang erfolgreich beendet	11:22:59
...
0017	AS 3	B ₃₀	GE: Bearbeitungsvorgang B ₃₀ gestartet	11:55:16
0018	AS 3	B ₃₀	SE: Störung von AS 3	12:15:22
0019	AS 3	B ₃₀	PE: Bearbeitungsvorgang B ₃₀ aktiv	12:23:16
0020	AS 3	B ₃₀	GE: Bearbeitungsvorgang B ₃₀ erfolgreich beendet	13:01:16

6.2.3 Beschreibung der Regelstruktur und Wirkmechanismen

Zur Koordination der einzelnen CPS kommt die Produktionsregelung im CPPS zum Einsatz. So ergibt sich ein Zusammenspiel zwischen einer übergeordneten Produktionsregelung in einem Unternehmen und den Regeleinheiten an jedem Arbeitssystem in Form von CPS. Abbildung 25 stellt diesen Zusammenhang dar.

6 Regelungsbasierte Ereignisverarbeitung

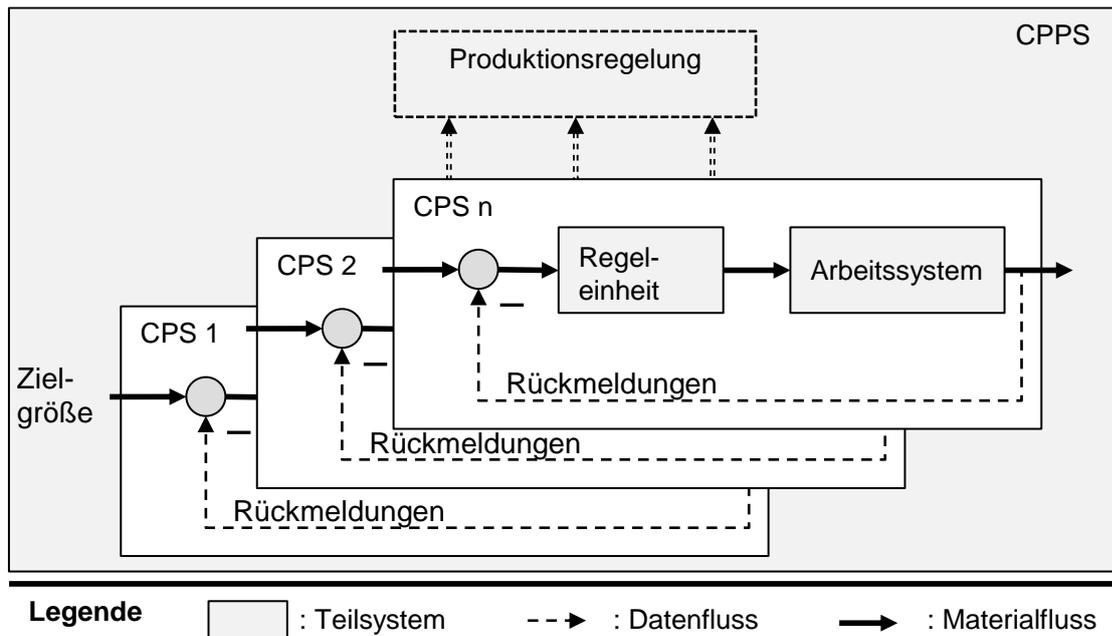


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen der Produktionsregelung und den Regeleinheiten an den Arbeitssystemen

Die Regeleinheit des CPS kann mit den erläuterten Maßnahmen (vgl. Abschnitt 2.4.5) in die Prozesse der Auftragsabarbeitung mit den Stellgrößen Reihenfolge, Bestand und Kapazität eingreifen. Die Produktionsregelung ist diesen Regeleinheiten übergeordnet und koordiniert die einzelnen Maßnahmen an dem CPS im Sinne der logistischen Zielgrößen eines Unternehmens. Wie schon in der Referenzarchitektur dargestellt (vgl. Abbildung 18), verfügt die Produktionsregelung zur Durchführung der Koordination über interne Funktionen wie Prognose-, Modellierung- und Informationssysteme (vgl. Abbildung 26).

Die Eingangsgrößen der Produktionsregelung sind Ereignisketten jedes Arbeitssystems zum aktuellen Produktionsfortschritt (vgl. Abschnitt 6.2.2), die nach einer Verarbeitung zu Regelmaßnahmen führen. Durch ungeplante Ereignisse, wie plötzlich auftretende Maschinenstörungen, sind regelnde Maßnahmen notwendig. Unberücksichtigte sowie nicht erkannte Störungen führen zu einer dauerhaften Differenz zwischen Ist- und Soll-Zustand bei der Produktionsleistung und somit zu einer terminlichen Abweichung gegenüber dem Produktionsplan. Zur Erkennung von Verzögerungen im Produktionsprozess werden entsprechende Wirkmechanismen eingeführt.

6.2 Entwicklung einer Produktionsregelung

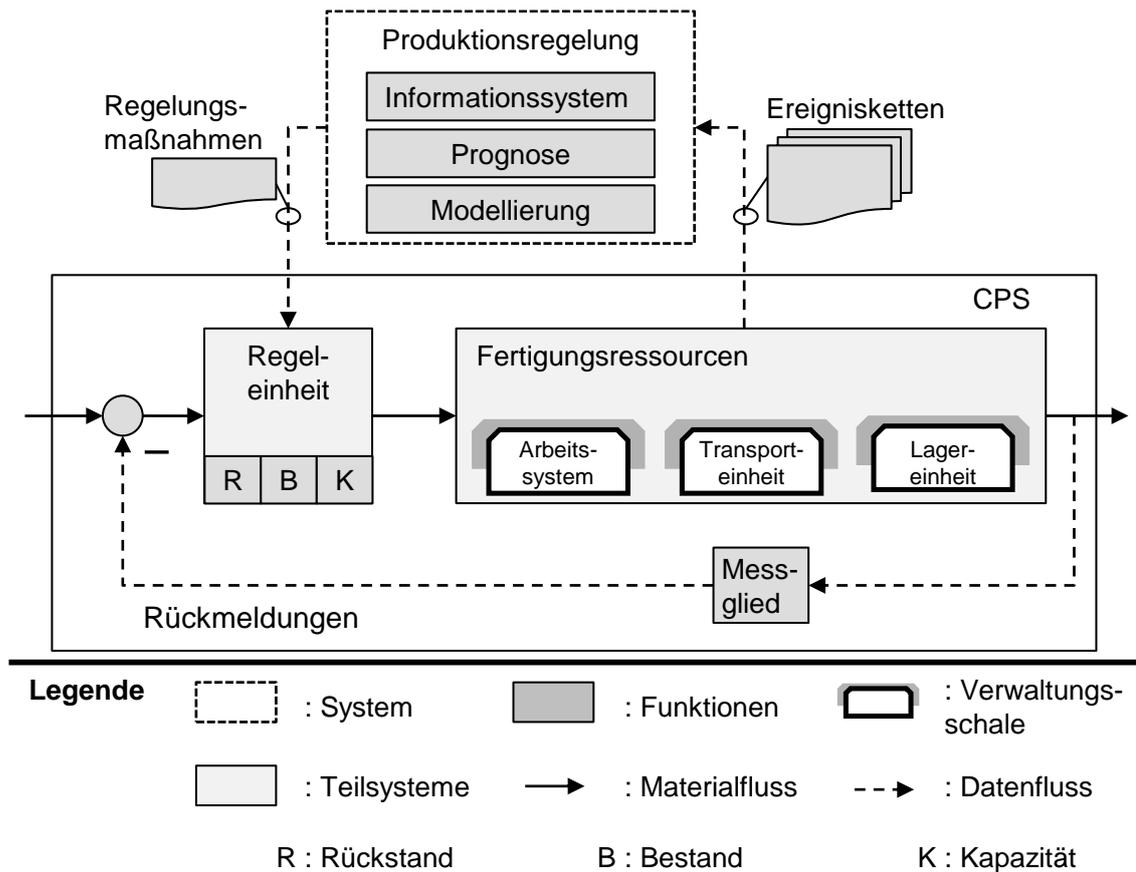


Abbildung 26: Übersicht über die Regelstruktur

Generell kann zwischen den zwei Fällen

1. Störungen an einem Arbeitssystem und
2. zeitliche Abweichung des Produktionsprozesses ohne ausgewiesenen Grund

als ungeplantes Ereignis unterschieden werden. Im Fall 1, z. B. einem Maschinenschaden, wird unmittelbar eine Nachricht mit relevanten Informationen an die Produktionsregelung gesendet. Die Erkennung von zeitlichen Veränderungen im Produktionsablauf im Vergleich zur Planung erfolgt mithilfe der Ereignisketten. Diese Ereignisse werden in der Produktionsplanung erstellt und können bis zur Freigabe des Auftrags bearbeitet werden. Die Listen mit Ereignissen liegen sowohl der Produktionsregelung als auch jedem spezifischen CPS vor.

Das CPS hat die Aufgabe, bei dem Erreichen der Zeitpunkte GE und PE den aktuellen Zustand des Arbeitssystems an die Produktionsregelung zu übertragen. Die übergeordnete Regelung kann daraufhin Ist- und Soll-Zustand hinsichtlich der Produktionsleistung abgleichen. Durch diese Vorgehensweise können ein verzögertes

6 Regelungsbasierte Ereignisverarbeitung

oder ein verfrühtes Bearbeitungsende identifiziert werden. Kommt es zu einer Detektion eines zeitlichen Verzuges, unabhängig von Fall 1 oder 2, wird eine Regelungsmaßnahme eingeleitet. In Abschnitt 6.2.4 sind die Maßnahmen der Regelvorgänge detailliert beschrieben.

6.2.4 Gestaltung der Regelungsmaßnahmen

Die Produktionsregelung basiert auf der Möglichkeit, flexibel in den Fertigungsablauf einzugreifen, um sowohl mit schwankender Auftragsbelastung als auch mit unerwarteten Ereignissen umzugehen. Dazu müssen die verwendeten Fertigungsressourcen Maßnahmen zur Anpassung von Kapazität, Bestand und Reihenfolge nutzen. Diese Maßnahmen tragen dazu bei, die Herausforderungen der Produktion zu bewältigen. Sie lassen sich in einer zeitlichen Dimension beschreiben und sind in Abbildung 27 dargestellt.

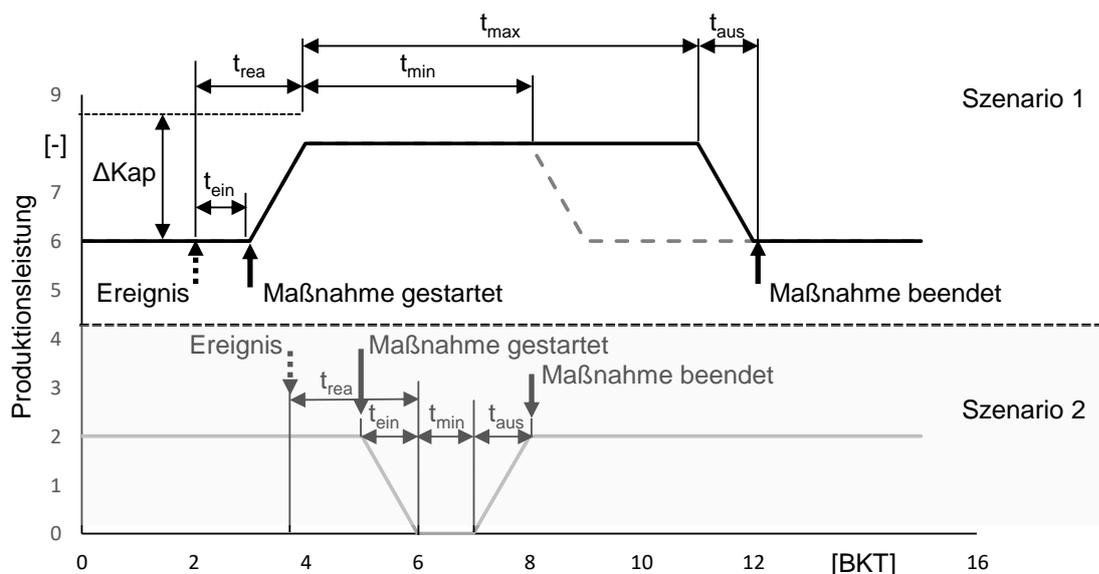


Abbildung 27: Beschreibung der Kapazitäts- und Bestandsmaßnahmen in Anlehnung an Koether (2018) und Schulz (2018)

Die Beschreibung der Maßnahmen in einer zeitlichen Dimension lässt sich mithilfe einer Hüllkurve durchführen. Diese Kurven sind hilfreich, um jede Maßnahme in Bezug auf die Reaktionszeit, die Parameter zur Aufrechterhaltung der Maßnahme und einen variablen Kapazitätsbetrag zu charakterisieren. Es lassen sich dadurch organisatorische und technische Randbedingungen darstellen. Für alle Produktionsressourcen, die eine Flexibilität bereitstellen, werden maßnahmenindividuelle

Hüllkurven erzeugt (vgl. Abbildung 27). Dadurch beschreiben die Hüllkurven die zeitlichen Rahmenbedingungen zur Ergreifung der Maßnahmen.

Die Veränderungen einer Produktionskapazität (ΔKap) oder die Bestandsveränderungen werden mit standardisierten Parametern beschrieben (vgl. Tabelle 5). Im vorliegenden Beispiel (vgl. Abbildung 27, Szenario 1) erfordert ein Ereignis, z. B. ein Eilauftrag, eine kurzfristige Erhöhung der Produktionskapazität an einem Arbeitssystem. Die Bereitstellungszeit der Kapazitätserhöhung unterteilt sich in die *Reaktionszeit* (t_{rea}) und die *Zustandsänderungszeit* (t_{ein}). Während die *Reaktionszeit* vor allem durch organisatorische Faktoren bestimmt wird, ist die *Zustandsänderungszeit* von technischen und logistischen Faktoren beeinflusst. Die *Reaktionszeit* beschreibt die gesamte Zeitspanne von der Aktivierung bis zur Bereitstellung der Maßnahme. Im Weiteren wird jeder Maßnahme eine minimale und maximale *Einsatzdauer* zugeordnet. Dies kann mit verfügbarem Personal an den Arbeitssystemen oder der Verfügbarkeit der Werkzeuge in Zusammenhang stehen. Die *Zeitdauer* der Beendigung der Maßnahme wird als *Zustandsänderungszeit* (t_{aus}) bei Ausschalten bezeichnet. Diese kann sich je nach Maßnahme von der Einschaltzeit unterscheiden. Mit diesen fünf Parametern lassen sich ebenfalls Maßnahmen der Reihenfolgeänderung beschreiben. In Szenario 2 in Abbildung 27 wird beispielhaft dargestellt, wie sich Änderungen der Auftragsreihenfolge auf die Produktionsleistung auswirken. Eine ausführlichere Erläuterung und Einbindung in den Regelkreis erfolgen in Abschnitt 6.4.

Tabelle 5: Beschreibung der Hüllkurvenparameter

Kapazitätsverschiebung	Parameterbeschreibung	
ΔKap	t_{rea}	Reaktionszeit
	t_{ein}	Zustandsänderungszeit bei Einschalten
	t_{aus}	Zustandsänderungszeit bei Ausschalten
	t_{min}	Minimale Einsatzdauer
	t_{max}	Maximale Einsatzdauer

Die vorgestellten Hüllkurven dienen der Beschreibung von Regemaßnahmen von Arbeitssystemen. Auf Grundlage dieser Kurven werden die Flexibilitätsmaßnahmen in die regelungstechnischen Modelle (vgl. Abschnitt 7.3.2) übernommen.

6.3 Informationsverarbeitung im Produktionsregelkreis

6.3.1 Allgemeines

Es ist zunächst notwendig, den generellen Aufbau und die Funktionsweise eines konsistenten Regelungssystems für CPPS zu konzipieren. Basierend auf den eingeführten grundlegenden Erkenntnissen (vgl. Abschnitte 2.4.5 und 2.5) werden im Folgenden die beiden Forschungsgebiete der Produktionsregelungssysteme und das CPS zusammengeführt.

Der nächste Abschnitt beinhaltet die generische Beschreibung einer ereignisgesteuerten Regelung für CPS. Ausgehend von den in CPS regelbaren Größen wird dieses grundsätzliche Regelungssystem im Rahmen der Arbeit spezifiziert. Bestandteile dieses Abschnitts sind außerdem die Interaktion der CPS untereinander und die Bildung des CPPS.

6.3.2 Ereignisgesteuerte Regelung

Die Grundlage des folgenden Schemas für eine ereignisgesteuerte Regelung lässt sich auf jede Fertigungsressource eines CPPS anwenden (Berger et al. 2018b; Brinzer und Banerjee 2017; Monostori 2014). In Abbildung 28 ist ein generischer Regelkreis für Fertigungsressourcen dargestellt. Die kontinuierliche Regelgröße $y(t_k)$ wird zu bestimmten äquidistanten Zeitpunkten entsprechend der Abtastfrequenz (vgl. Formel (7 - 9)) abgetastet und in die diskrete Wertefolge $y(t)$ überführt. So gelten die Zusammenhänge der Formel (10):

$$t_k = k * T_a \quad k \in \mathbb{N} \quad (10)$$

mit t_k	Abtastzeitpunkt [s]
k	natürlichen Zahlen [-]
T_a	Periodendauer [s]

Zu jedem Abtastzeitpunkt t_k wird überprüft, ob der zugehörige Wert $y(t_k)$ die ereignisauslösende Bedingung erfüllt oder ob er sich innerhalb eines Toleranzfeldes befindet. Wird eine kritische Grenze überschritten, erzeugt die informationsverarbeitende Einheit ein Ereignis, das die zuletzt übermittelte Regelgröße $y(t_{k-1})$ aktualisiert und sie für den neuen Vergleich mit der vorgegebenen Führungsgröße $w(t)$

heranzieht. Die Regeleinrichtung erhält die sich ergebende Regelabweichung $e(t_k)$ und berechnet daraus die Stellgröße $u(t_k)$, um der Störgröße $z(t)$ entsprechend entgegenzuwirken. Wird die Toleranzgrenze zur Ereignisauslösung nicht überschritten, findet keine Aktualisierung der zuletzt übertragenen Regelgröße $y(t_{k-1})$ statt. In diesem Fall kann erst der zum nächsten Abtastzeitpunkt t_{k+1} abgetastete Wert der Regelgröße $y(t_{k+1})$ zu einer Neuberechnung der Stellgröße $u(t_{k+1})$ führen. Um den Charakter des für Regelungen typischen geschlossenen Wirkungskreislaufes stets aufrecht zu erhalten, führt ein Pfeil bei Nichtauslösung zurück zur Regelstrecke.

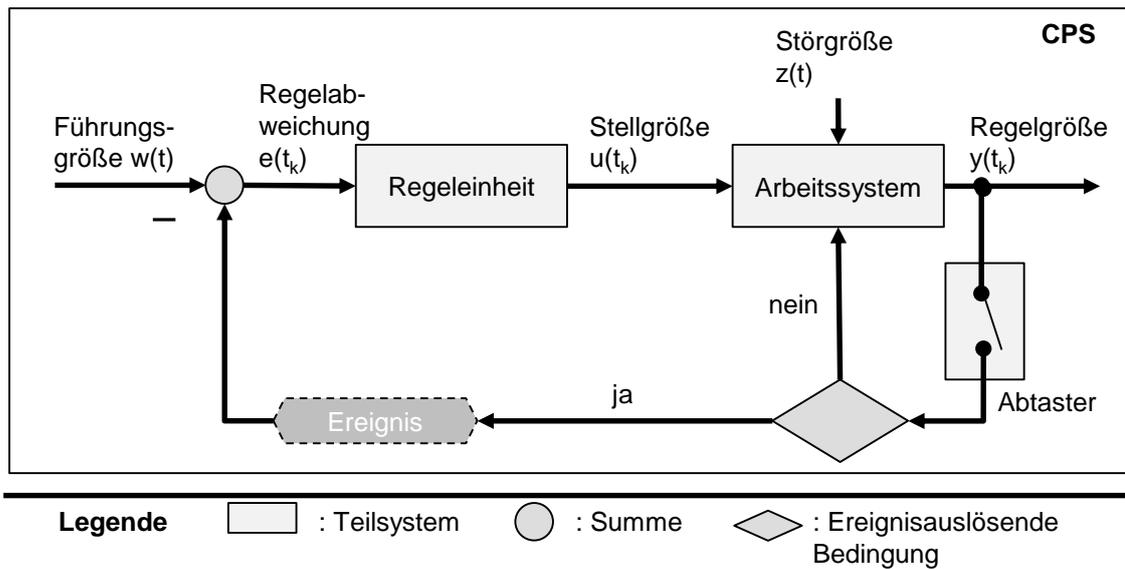


Abbildung 28: Darstellung des ereignisgesteuerten Regelkreises in Anlehnung an (Berger et al. 2018b)

Diese generische Beschreibung des ereignisgesteuerten Regelkreises ist die Grundlage für die folgenden Abschnitte.

6.3.3 Erweiterung des Regelkreises

Basis für das Regelungssystem in CPPS bildet das Modell der Fertigungssteuerung nach Lödding (2016). Dieses veranschaulicht neben den Aufgaben der Stell-, Regel- und Zielgrößen auch die Wechselwirkungen und Abhängigkeiten dieser Elemente im Rahmen der Produktionsplanung und -steuerung. Um das Modell für die ereignisgesteuerte Produktionsregelung von CPS anwenden zu können, bedarf es einiger Anpassungen. Das neue, erweiterte Modell ist in Abbildung 29 dargestellt.

6 Regelungs-basierte Ereignisverarbeitung

Im erweiterten Modell gibt das Element der Auftragserzeugung den benötigten Auftragsplan vor.

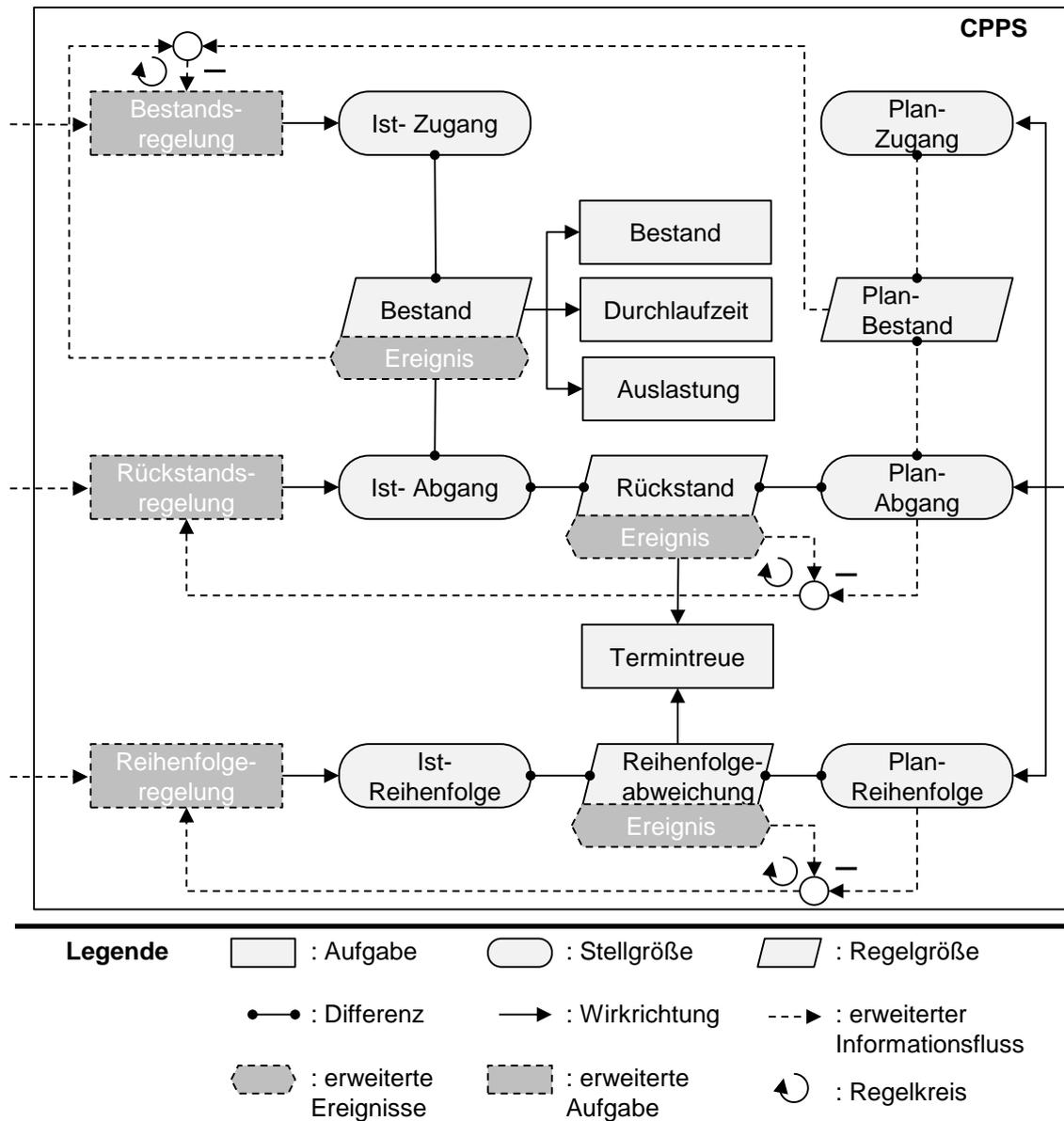


Abbildung 29: Erweitertes Modell der Fertigungssteuerung in Anlehnung an (Berger et al. 2018b)

Jedes Arbeitssystem bezieht vom hierarchisch übergeordneten Produktionssystem (CPPS) den entsprechenden Auftragsplan. Dieser Auftragsplan gibt Auskunft über die zugeteilten, zeitlich vorterminierten Aufträge und enthält neben Plan-Zugang und Plan-Abgang auch die Plan-Reihenfolge. Da sich der Bestand als die Differenz von kumuliertem Zu- und Abgang berechnen lässt, legt der Auftragsplan indirekt auch den Plan-Bestand fest. Da der Plan-Bestand zur präzisen Visualisierung der

Bestandsregelung notwendig ist, wurde er im ursprünglichen Modell von Lödning (2016) ergänzt.

Kern des in Abbildung 29 dargestellten Modells einer Fertigungssteuerung bilden drei ereignisgesteuerte Regelkreise. Ausgehend von den durch Lödning festgelegten zentralen Regelgrößen Bestand, Rückstand und Reihenfolgeabweichung, wurden die drei Regelkreise der Bestands-, Rückstands- und Reihenfolgeregelung definiert. Zur Verdeutlichung des produktionsregelungstechnischen Charakters wurden die Aufgaben der Produktionssteuerung (vgl. Abschnitt 2.4.5) in die Aufgaben der Produktionsregelung überführt. Anstelle von Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung sind im neuen Modell die Begrifflichkeiten Bestands-, Rückstands- und Reihenfolgeregelung definiert. Hervorgerufen werden die Regelaktivitäten durch die Erfüllung der ereignisauslösenden Bedingungen (vgl. Abschnitt 6.3.2). Überschreitet beispielsweise das Bestandsniveau oder der Rückstand eine vorgegebene Toleranzgrenze, wird die entsprechende Größe in Form eines Ereignisses übermittelt und nach dem Vergleich mit der zugehörigen Führungsgröße an die Regeleinrichtung weitergeleitet. Sowohl die ereignisauslösenden Bedingungen als auch die jeweiligen Führungsgrößen orientieren sich hierbei an den ebenfalls im Modell dargestellten logistischen Zielgrößen.

Jeder der drei Regelkreise besitzt eine kennzeichnende Regelgröße, die hinsichtlich der Regelungsmechanismen grundlegend andere Eigenschaften aufweist und ausschlaggebend für die konkrete Auslegung der jeweiligen Struktur ist. Folglich sind für die drei Regelkreise die Beeinflussungsmöglichkeiten über die entsprechenden Stellgrößen und die ereignisauslösenden Bedingungen prinzipiell verschieden. In den folgenden Abschnitten werden die Rückstands-, Bestands- und Reihenfolgeregelung detailliert vorgestellt. Anschließend werden die drei Regelkreise wieder zusammengeführt und in ein kaskadiertes Regelungssystem integriert (vgl. Abschnitt 6.4.4).

6.4 Produktionsregelung

6.4.1 Rückstandsregelung

Scholz-Reiter et al. (2014) verstehen unter einem Rückstand „[...] die Anzahl von Arbeitsaufträgen [...], deren Restbearbeitungszeit den verbleibenden Zeitraum bis zu der bei der Auftragsfreigabe eingeplanten Fertigstellung überschreitet“. Die

6 Regelungs-basierte Ereignisverarbeitung

Folge eines Rückstandes ist die verspätete Auslieferung des Produktes an den Kunden und damit einhergehend eine schlechter werdende Kundenzufriedenheit (Köcher und Romeike 2016). Diese Verzögerung zeigt sich in einem Rückgang der Zielgröße Termintreue. Um die Anzahl an verspäteten Aufträgen, respektive die maximale Verspätung, von Aufträgen zu minimieren und damit die Termintreue zu maximieren, bedient sich die Rückstandsregelung der Maßnahme der Kapazitätssteuerung. Durch eine gezielte Erhöhung oder Senkung des Kapazitätsangebotes besteht die Möglichkeit zur Adaption der Stellgröße des Ist-Abgangs $u_R(t_{k,R})$ (vgl. Abbildung 30). Hierzu wird die zu minimierende Regelgröße des Rückstands $y_R(t)$ entsprechend der Frequenz $f_{a,R}$ abgetastet und mit der Führungsgröße des Plan-Abgangs $w_R(t)$ verglichen.

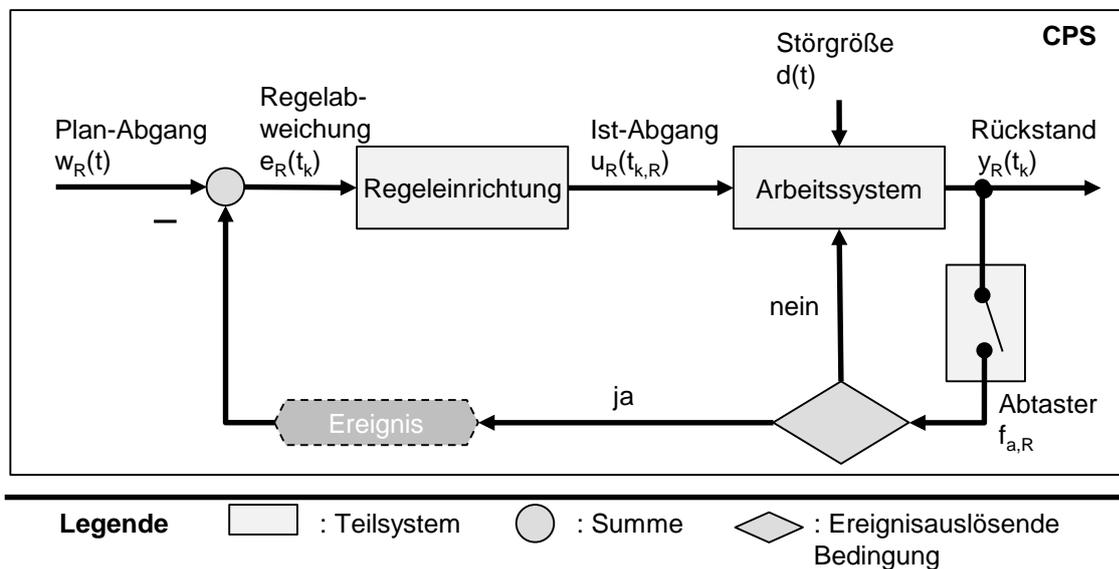


Abbildung 30: Rückstandsregelkreis in einem CPS

Die entscheidenden Stellhebel der Rückstandsregelung liegen in der kurzfristigen Steuerung der maschinellen und personellen Kapazitäten (Schuh 2015; Toonen et al. 2014). Tabelle 6 zeigt eine Übersicht an Möglichkeiten der Kapazitätsanpassung, um den Ist-Abgang zu beeinflussen. Die Auflistung erhebt allerdings nicht den Anspruch auf absolute Vollständigkeit, sondern soll vielmehr eine Auswahl potenzieller Maßnahmen aufzeigen. Lang- und mittelfristige Möglichkeiten der Kapazitätsanpassung, wie beispielsweise die Beschaffung bzw. den Abstoß von Produktionsanlagen sowie die Rekonfiguration modularer Anlagen, eignen sich nicht für die ereignisbasierte Ausregelung von unerwarteten Störungen und werden daher im Folgenden nicht berücksichtigt.

Tabelle 6: Möglichkeiten der Kapazitätsanpassung

Ausgewählte Maßnahmen der Produktionsregelung
<p>Mehrmaschinenbedienung</p> <p>Bei der Mehrmaschinenbedienung ist ein Mitarbeiter gleichzeitig für mehrere Maschinen zuständig. Diese Handlungsmaßnahme kommt insbesondere dann zum Einsatz, wenn ein Mitarbeiter kurzfristig ausfällt und ein anderer Mitarbeiter freie Kapazitäten hat. Sie verlangt einen erhöhten Koordinierungsaufwand und ist nur bei Arbeitsvorgängen geeignet, die eine im Verhältnis zur Bearbeitungszeit geringe Personalzeit erfordern (Lödding 2016).</p>
<p>Auftragssplitting</p> <p>Aufträge mit hohen Stückzahlen können auf mehrere Arbeitsplätze verteilt werden, damit die Arbeiten insgesamt früher abgeschlossen werden. Da dies rüstzeittechnisch ineffizient ist, muss genau geprüft werden, in welcher Situation die Aufteilung sinnvoll ist (Lödding 2016).</p>
<p>Überstunden / Zusatzschichten</p> <p>Überstunden und Zusatzschichten sind oft verwendete Maßnahmen zur Reduzierung eines Auftragsrückstands. Voraussetzung für den Einsatz sind freie maschinelle Kapazitäten und die Bereitschaft der Mitarbeiter zur Mehrarbeit (Schuh und Stich 2012).</p>
<p>Zeitpunkt der Auftragsfreigabe</p> <p>Der Zeitpunkt der Auftragsfreigabe hat Einfluss auf die Höhe des Umlaufbestands. Diese Höhe wirkt sich direkt auf die Zielgrößen Auslastung, Durchlaufzeit und Bestand aus. Entsprechend kann die Durchlaufzeit durch eine spätere Auftragsfreigabe gesenkt und die Auslastung durch eine frühere Auftragsfreigabe erhöht werden (Schuh 2015).</p>
<p>Höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit</p> <p>Einige leistungsstarke automatisierte Maschinen bieten die Möglichkeit, die Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu verringern. Für die Serienfertigung ist es von Vorteil, eine möglichst kostensparende und verschleißarme Geschwindigkeit zu wählen. Daher wird die maximale Leistung einer Maschine oftmals nicht ausgenutzt. Kommt es in der Produktion zu langen Warteschlangen, kann eine leistungsstärkere, aber auch ressourcenintensivere Geschwindigkeit eingestellt werden, die wunschgemäß zu kürzeren Bearbeitungszeiten führt und so den Auftragsrückstand verringert (Fallenbeck und Eckert 2014).</p>

Die Kapazitätsanpassung ist nicht in beliebiger Höhe realisierbar, sondern unterliegt Restriktionen.

6.4.2 Bestandsregelung

Lokale Bestandsregelkreise ermöglichen die gezielte Beeinflussung des lokal verfügbaren Auftragsbestands an einem Arbeitssystem. Durch die Einstellung eines bestimmten Betriebspunktes (vgl. Abschnitt 2.4.3) lassen sich so die gewünschten Ausprägungen der logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung regeln. Im Rahmen einer adäquaten Konfiguration der Bestandsregelung ist die Orientierung an folgenden Zielkriterien möglich (Martin 1998):

- maximale Kapazitätsauslastung
- minimale Summe der Leerzeiten
- minimale Summe und Varianz der Gesamtdurchlaufzeit
- minimale Durchlaufzeit der Werkstücke mit der längsten Gesamtbearbeitungszeit
- minimale Zahl der in der Produktion gebundenen Aufträge

Die bereits in Abbildung 29 angedeutete Struktur eines Bestandsregelkreises ist in Abbildung 31 detailliert dargestellt.

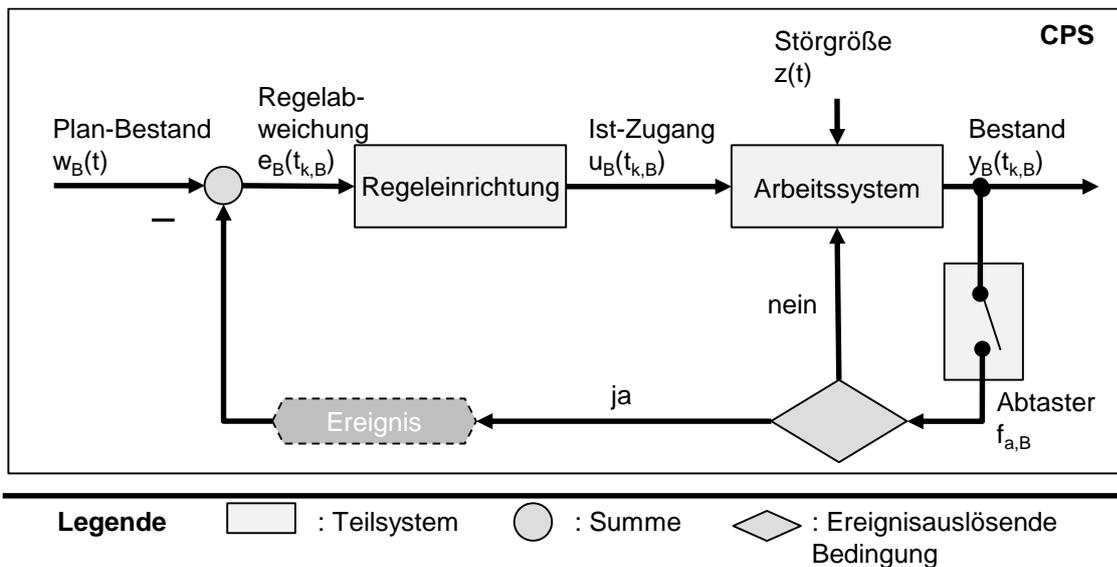


Abbildung 31: Bestandsregelkreis in CPS

Der zu regelnde Bestand $y_B(t)$ wird entsprechend der Frequenz $f_{a,B}$ abgetastet und im Falle der Erfüllung der ereignisauslösenden Bedingung mit dem Plan-Bestand $w_B(t)$ verglichen. Abhängig von der Regelabweichung $e_B(t_{k,B})$ wird anschließend der Ist-Zugang $u_B(t_{k,B})$ als Stellgröße neu berechnet. Der im Zuge der Bestandsregelung variierbare Ist-Zugang $u_B(t_k)$ wird dabei mit Hilfe von Methoden der Auftragsfreigabe in die Realität umgesetzt. Abhängig vom aktuellen Bestand erteilt

oder verwehrt das Regelungssystem den direkten Vorgänger-Arbeitssystemen die Freigabe von Arbeitsaufträgen, weshalb hier prinzipiell auch von einer Pull-Steuerung gesprochen wird (Westkämper 2009).

Neben der Freigabe von mehr oder auch weniger Aufträgen gibt es noch alternative Möglichkeiten auf das Bestandsniveau anderer Arbeitssysteme Einfluss zu nehmen (Schuh et al. 2014b). Zu nennen ist hier beispielsweise die Teilung von Aufträgen (Schuh und Stich 2012) und die damit einhergehende Losgrößenänderung (Martin 1998). Weitere Optionen sind die terminliche Verschiebung von Arbeitsgängen auf nachgelagerte Ressourcen, die Zuweisung der Produktionsaufträge zu alternativen Ressourcen mit gleichen Fähigkeiten (Schuh und Stich 2012) oder Auf- und Abbau von Überkapazitäten (Westkämper 2009). Für die konkrete Ausgestaltung und Anwendung auftragsfreigebender Verfahren der Bestandsregelung sei auf Lödding (2016) verwiesen.

6.4.3 Reihenfolgeregelung

Die Reihenfolgeregelung der CPS steuert die Bildung der Reihenfolge für Aufträge, die sich in der Warteschlange des AS befinden. Das Hauptziel besteht darin, die Stellgröße der Ist-Reihenfolge $uF_{(tk,F)}$ von den fertiggestellten Aufträgen an die vorgegebene Führungsgröße der Plan-Reihenfolge $wF_{(t)}$ des CPPS anzupassen. Dadurch wird die abgetastete Regelgröße der Reihenfolgeabweichung $yF_{(t)}$ minimiert (vgl. Abbildung 32). Dies geschieht entsprechend der Frequenz $f_{a,F}$.

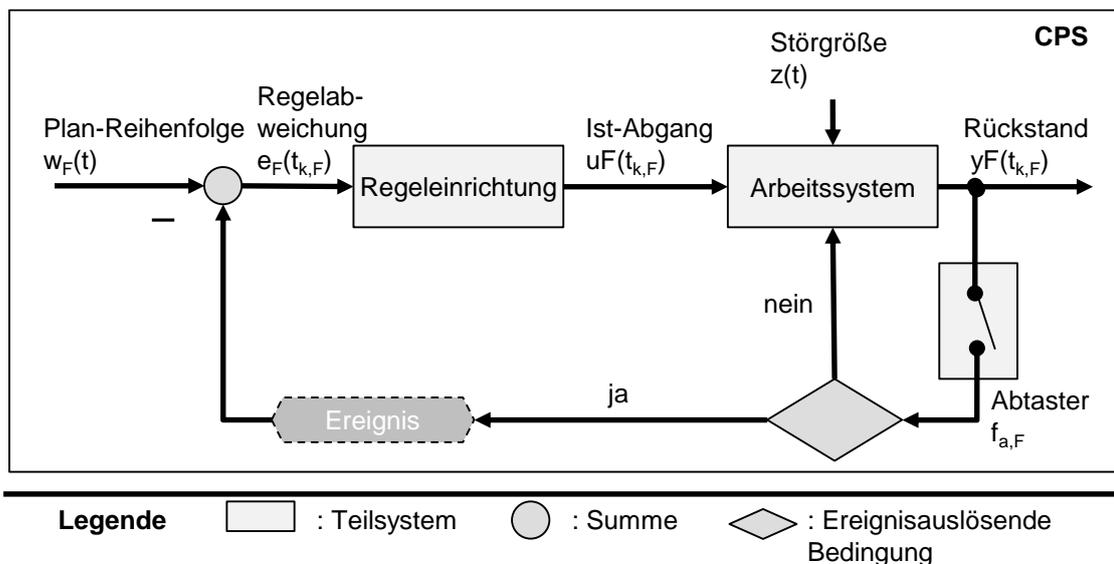


Abbildung 32: Reihenfolgeregelkreis in CPS

Der Grund für die gewünschte Reduzierung der Reihenfolgeabweichung liegt in der andernfalls eintretenden erhöhten Streuung der Durchlaufzeiten. Eine Folge davon wäre eine Verschlechterung der Termintreue beziehungsweise des Servicegrades (Lödding 2001).

Die Festlegung der Ist-Reihenfolge erfolgt bei der Reihenfolgebildung durch definierte Reihenfolgeregeln. Diese ordnen den am Arbeitssystem wartenden Aufträgen eine lokale Prioritätskennzahl zu, nach der die Bearbeitung durchgeführt wird. Die Zuweisung der höchsten Priorität richtet sich beispielsweise nach dem Liefertermin, der Restbearbeitungszeit oder dem Freigabezeitpunkt der nachfolgenden Arbeitssysteme (Westkämper 2009). So kann beispielsweise das Vertauschen der Bearbeitungsreihenfolge von Aufträgen zwar zu einer Verzögerung eines einzelnen, dafür zur Beschleunigung anderer, kurzfristig höher priorisierter Aufträge führen. Auch die kapazitätsbedingte Umlagerung auf eine Ausweichmaschine kann Auswirkungen auf die Ist-Reihenfolge haben, wodurch beispielsweise Rüstzeiten reduziert werden können.

6.4.4 Regelstruktur in Cyber-physischen Produktionssystemen

In dem folgenden Abschnitt werden die bisherigen Erkenntnisse zusammengeführt und eine Regelstruktur für CPPS abgeleitet.

Zur Gestaltung einer Regelstruktur für CPS in einem entsprechenden Produktionssystem müssen die folgenden zwei entscheidenden Merkmale berücksichtigt werden:

1. Wechselseitige Abhängigkeit der Regelgrößen
2. Autonomie der Cyber-physischen Systeme

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass sich die verschiedenen Regelgrößen Bestand, Rückstand und Reihenfolgeabweichung multidirektional beeinflussen und daher nicht autark zu betrachten sind. Die Einflüsse der Regelgrößen können dabei in direkte und indirekte unterschieden werden.

Die direkte Beeinflussung der Regelgrößen untereinander lässt sich beispielsweise an den Wechselwirkungen von Bestands- und Rückstandsregelung verdeutlichen. Die beiden Regelgrößen Bestand und Rückstand sind über die Stellgröße Ist-Abgang miteinander verknüpft. Wird eine zulässige Kapazitätserweiterung umgesetzt, führt dies zu einer Erhöhung des Ist-Abgangs und zeitgleich auch zu einem Rückgang des Bestandes. Aus einem bestandsregelnden Blickwinkel betrachtet,

hat auch die Auftragsfreigabe einen direkten Einfluss auf den Rückstand. Wird beispielsweise ein Auftrag zu spät freigegeben, kann sich dieser im Rückstand befinden, obwohl die Kapazität ausreichend dimensioniert ist. Eine im Fall der isolierten Rückstandsregelung durchgeführte Kapazitätserweiterung an diesem Arbeitssystem wäre nicht nur zwecklos, sondern sogar kontraproduktiv, da hierdurch die Ressourcen nicht für diejenigen Arbeitssysteme zur Verfügung stehen, die den eigentlichen Engpass darstellen.

Ein Beleg des indirekten Einflusses ist, dass sich viele der bei der Regelung durchgeführten Aktivitäten auf mehrere Regelkreise auswirken. Zu nennen ist hier beispielsweise die Rüstzeitminimierung in Folge einer Reihenfolgevertauschung. Diese Maßnahme führt zu einer Abweichung gegenüber der ursprünglich geplanten Reihenfolge und kann unter Umständen auch eine Reduzierung des Rückstands bewirken. Eine andere gegenseitige Beeinflussung indirekter Art zeigt die Losgrößenänderung, respektive überlappende Bearbeitung. Die vorzeitige Fertigstellung eines Teillooses bedeutet für ein bestimmtes Arbeitssystem eine Reduzierung des Rückstands. Für das nachfolgende Arbeitssystem hingegen ist es eine Zunahme des Bestands. Des Weiteren lässt sich eine wechselseitige Abhängigkeit der Regelgrößen ableiten. Dies geschieht durch die in Abschnitt 2.4.3 vorgestellten Produktionskennlinien zur Erklärung der Korrelationen zwischen den logistischen Zielgrößen. Ein beispielhaftes Szenario, das durch die Produktionskennlinien veranschaulicht wird, ist eine Erhöhung des Bestandes. Sie führt zwar zu einer steigenden Leistung, aber unweigerlich auch zu einer Erhöhung der Durchlaufzeit. Da wiederum die Durchlaufzeit Auswirkungen auf die Termintreue hat, kann auch von einer indirekten Beeinflussung des Bestandes auf die Termintreue ausgegangen werden. Aufgrund der Tatsache, dass die Regelgrößen einen Einfluss auf die Ausprägung der Zielgrößen haben, lässt sich aus der Interdependenz der Zielgrößen auch auf eine Interdependenz der Regelgrößen schließen.

Das zweite Merkmal von CPPS ist das Ziel der Flexibilitätssteigerung des gesamten Produktionssystems (vgl. Abschnitt 2.2). Aufgrund ihrer Fähigkeiten zur selbstständigen, intelligenten Datenverarbeitung und zur Kommunikation mit anderen CPS kann ihnen eine gewisse Autonomie zugesprochen werden. Damit die Interaktion der Systeme untereinander in eine Selbstorganisation in der Fertigungsebene münden kann, müssen die CPS über die Freiheitsgrade der dezentralen Steuerung verfügen.

Verstärkt wird die Notwendigkeit einer dezentralen Steuerung durch die Zunahme der in der Produktion beziehungsweise in den CPS vorhandenen Sensoren (Berger

et al. 2016a). Die Präsenz von Sensoren führt zu einem exponentiellen Anstieg der anfallenden Daten. Würden sämtliche Datenmengen des Netzwerks zur Verarbeitung in einem Zentralrechner weitergeleitet werden, könnte dies zum einen zu nicht akzeptablen Rechenzeiten und zum anderen zur Überlastung der Kommunikationsinfrastruktur führen. Die Forderung nach Echtzeitfähigkeit wäre in einem solchen überlasteten System unerfüllbar. Da eine dezentrale Regelung der CPS die Planungskomplexität durch eine Filterung der Informationen deutlich reduziert, können diese Probleme vermieden werden.

Ein weiterer Aspekt, der die Notwendigkeit einer dezentralen Steuerung bzw. Autonomie verdeutlicht, ist die Wandlungsfähigkeit zukünftiger Produktionssysteme. Nur durch die Verfügbarkeit modularer, selbständiger Systeme kann eine einfache, schnelle und unkomplizierte Integrierbarkeit neuer oder veränderter Bestandteile sichergestellt werden. Im Falle einer zentralen Steuerung könnte die Integration einer neuen Maschine in die Regelungslogik eine Unterbrechung des gesamten Produktionssystems zur Folge haben.

Diese Zusammenführung der drei Regelkreise Rückstands-, Bestands- und Reihenfolgeregelung kann in einem CPS umgesetzt werden. Abbildung 33 zeigt die in Anlehnung an Nyhuis et al. (2009a) entwickelte Struktur eines ereignisgesteuerten kaskadierten Regelungssystems eines CPS. Das Modell integriert die in den Abschnitten 6.3.2 - 6.4.3 erläuterten Regelkreise für die Größen Bestand, Rückstand und Reihenfolge.

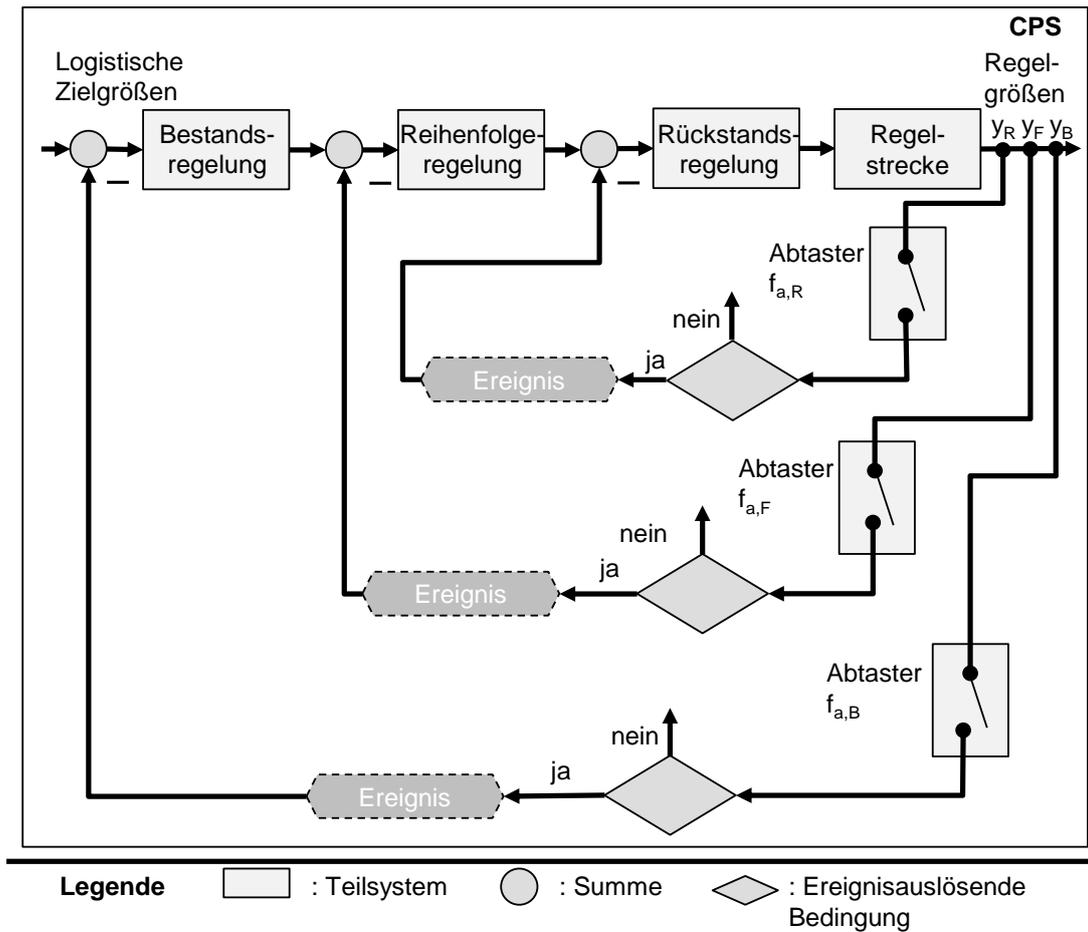


Abbildung 33: Kaskadierte Regelungsstruktur in Cyber-physischen Systemen in Anlehnung an (Berger et al. 2018b)

Neben den drei Regeleinrichtungen sind in Abbildung 33 auch die für die jeweilige Teilstrecke eingesetzten Abtaster sowie die Überprüfungen der ereignisauslösenden Bedingungen gekennzeichnet. Zur besseren Übersicht enthält das Modell jedoch nicht alle nötigen vorkommenden Führungs-, Stell-, Abweichungs- und Störgrößen. Entsprechend der Ansprechgeschwindigkeit und der Auswirkungen des Eingriffs bildet der Rückstandsregler den innersten Regelkreis. Da die Kundenzufriedenheit oberste Priorität hat (Nyhuis et al. 2016) und daher die Durchlaufzeit sowie die Termintreue häufig als die entscheidenden Faktoren angesehen werden, sollte die Bestandsregelung aufgrund ihrer weitreichenden Auswirkungen als letztmögliche Alternative zum Einsatz kommen. Der Grund hierfür ist, dass die Maßnahmen der Bestandsregelung einen größeren Änderungsaufwand bei der Bearbeitung der weiteren Produktionsaufträge nach sich zieht als bei den beiden weiteren Reglern. Bei einer Störung, die zu einer Verzögerung des Fertigungsablaufs führt, wird zunächst versucht, die Kapazität kurzfristig so weit zu erhöhen, dass der ur-

sprüngliche Plan eingehalten werden kann. Erst wenn die Ressourcen an ihre Kapazitätsgrenze stoßen, greifen die Reihenfolge- oder Bestandsregelung oder beide ein. Ihr Ziel ist es zu vermeiden, dass es zu einem weiteren Bestandsaufbau und einer zusätzlichen Verzögerung des ohnehin nicht erreichbaren Liefertermins wegen der resultierenden Durchlaufzeiterhöhung kommt. Das Modell in Abbildung 33 stellt hierbei jedoch lediglich eine generische Ausgangssituation dar. Je nach praktischem Anwendungsfall kann auch eine andere Reihenfolge der kaskadierten Regelkreise sinnvoll sein. Dies hängt von den vorhandenen Anlagen und deren Möglichkeiten bei der Maßnahmenenergreifung ab. Bei der problemspezifischen Konfiguration des Regelungssystems müssen auch die jeweiligen Verfahren zur Fertigungssteuerung ausgewählt und aufeinander abgestimmt werden. Verdeutlicht wird mit diesem Modell die Tatsache, dass zu einer den Anforderungen gerecht werdenden Regelung für ein jedes CPS die drei Regelkreise Rückstands-, Bestands- und Reihenfolgeregelung relevant sind. Da jeder Regelkreis andere Charakteristika und Einflussmöglichkeiten aufweist, existieren im Regelungssystem eines CPS drei voneinander variierende Abtastfrequenzen.

6.5 Fazit

Im zweiten Systemelement wurde die regelungsbasierte Ereignisverarbeitung entwickelt, die eine Funktionsgrundlage dieser Arbeit darstellt. Die Verarbeitung der Ereignisse setzt auf die entwickelte Architektur und auf die gezielte Generierung von Ereignissen, um eine Informationssparsamkeit sowie eine gezielte Produktionsregelung zu ermöglichen.

Für die Erweiterung der Ereignisketten wurde auf Basis des Shannon-Theorems ein Regelwerk entwickelt, um einen Ereignistyp hinzuzufügen. Durch die höhere Transparenz können die Maßnahmen zur Regelung gezielt eingesetzt werden. Um die Maßnahmen entsprechend umsetzen zu können, werden Hüllkurvenparameter beschrieben. Es können kaskadierte oder, in einzelner Form, ereignisgesteuerte Regler eingesetzt werden.

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

7.1 Übersicht

In den Kapiteln 5 und 6 wurden die Systemelemente zur Informations- und Ereignisverarbeitung erläutert. Das vorliegende Kapitel beschreibt den Aufbau der Produktionsmodelle auf Grundlage von regelungstechnischen Modellierungsmethoden. Dies ist zugleich das zentrale Systemelement dieser Arbeit. Die Modelle sind das Abbild der aktuellen Produktionsabläufe sowie der Leistungsfähigkeit der Arbeitssysteme, Lager- und Transporteinheiten. Zudem stellen die Modelle die Basis für die weiteren Analysen zur Stabilität des Produktionssystems dar.

Der Abschnitt 3.2.4 stellte bereits Ansätze zur Modellierung von Arbeitssystemen vor. Im Weiteren wird an Vorarbeiten von Petermann (1996), Breithaupt (2001) und Nyhuis (2008b) angeknüpft. Im folgenden Abschnitt werden zunächst eine Kategorisierung der jeweiligen Methodik der Modelle durchgeführt und die Parameter zur Modellierung der drei Fertigungsressourcen erläutert. Die Erstellung der Fertigungsmodelle orientiert sich dabei an der Methode der objektorientierten Modellbildung. Darauf aufbauend wird die Vorgehensweise zur Verknüpfung der Modelle erläutert (vgl. Abschnitt 7.4).

7.2 Modellklassifizierung

Abgeleitet aus der Zielstellung der Arbeit wird an dieser Stelle zunächst eine Modellklassifizierung durchgeführt. Hierfür gelten die grundsätzlichen Rahmenbedingungen des Realitätsbezugs, der Allgemeingültigkeit und der Beschränkung auf das Wesentliche (Freitag 2005). Die Klassifizierung lässt sich nach Page und Liebert (1991) und Zeigler (1984) nach voneinander unabhängigen Merkmalen, wie Untersuchungsmethode, Verwendungszweck, Abbildungsmedium, Eintrittsart von Ereignissen, Zeitverhalten und Zustandsübergänge, einordnen. Auf eine detaillierte Erläuterung der Merkmale wird an dieser Stelle verzichtet und auf Page und Liebert (1991) und Zeigler (1984) sowie Forrester (1973) verwiesen.

Die Auswahl der Modelle orientiert sich an den Anforderungen dieser Arbeit (vgl. Abschnitt 3.4). Dies bedeutet, dass die gewählte Methode die dynamischen Anforderungen einer Produktion erfüllt, sich für die Verarbeitung von Ereignissen eignet

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

sowie Prognosen ermöglicht. So ergeben sich die nachfolgend beschriebenen notwendigen Eigenschaften der Modelle.

Art der Untersuchungsmethode

Ein analytisches Modell gewährleistet die echtzeitnahe Reaktion auf aktuelle Änderungen im Fertigungsablauf. Die Gleichungsparameter können bedarfsgerecht geändert werden und das Gleichungssystem kann das Verhalten der Arbeitssysteme mit den gewählten Lösungsfunktionen beschreiben. Darüber hinaus können die Gleichungssysteme für Simulationsstudien genutzt werden.

Verwendungszweck

Eine Anforderung besteht darin, Prognosen über zukünftige Zustände der Fertigungsressourcen in der Produktion erstellen zu können. Dabei wird die Verwendung von Erklärungsmodellen und deskriptiven Modellen für diese Arbeit ausgeschlossen.

Abbildungsmedium

In Anlehnung an die Art der Untersuchungsmethode ergibt sich eine formelle Beschreibung der Methode, die eine grafische und mathematische Abbildung der Ergebnisse erlaubt.

Eintrittsart von Ereignissen

Die Verarbeitung von Ereignissen spielt eine entscheidende Rolle bei der Modellgestaltung. Die möglichen Ereignisse (vgl. Abschnitt 2.3) in einer Produktion sind im Gegensatz zum geplanten Fertigungsablauf nicht deterministisch. Der Zeitpunkt und die Auswirkungen ungeplanter Ereignisse, wie Maschinenstörungen, können nicht eindeutig bestimmt werden und sind daher stochastisch. Bei der modellbasierten Produktionsregelung sind sowohl stochastische als auch deterministische Vorgänge von Bedeutung. Daher ist dieses Merkmal allein nicht ausschlaggebend für die Auswahl einer Methode.

Zeitverhalten

Das zeitliche Verhalten kann auf der obersten Ebene nach Forrester (1973) in statische und dynamische Modelle unterteilt werden. Auf der zweiten Ebene unterscheiden sich Modelle hinsichtlich der Linearität. Es gibt lineare und nicht lineare Systeme, die sowohl stabil als auch instabil sein können. Da der Kernpunkt dieser Arbeit ein Abbild eines veränderbaren Produktionssystems ist, ist ein dynamisches Modell notwendig. Die Kriterien hinsichtlich Linearität und Stabilität lassen sich

nicht vorab festlegen, da diese von den anwendungsfallspezifischen Parametern abhängen.

Zustandsübergänge

Das Kennzeichen für die Veränderung der Modellvariablen sind die Zustandsübergänge. Nach Page und Liebert (1991) und Zeigler (1984) können Zustandsänderungen durch die drei Modelltypen hybride, ereignisdiskrete und kontinuierliche Modelle abgebildet werden.

Die kontinuierlichen Modelle weisen in einem strengen mathematischen Sinne eine stetige Zustandsveränderung auf. Jedoch finden diese oft Anwendung in dynamischen und gleichzeitig deterministischen Systemen, wie der Supply-Chain-Modellierung und der Materialflusssimulation (Helbing 2005; Mikhailov et al. 2005). Um eine realistischere Abbildung der Prozesse zu erreichen, werden kontinuierliche Modelle mit Elementen erweitert, die z. B. eine Berücksichtigung der Bearbeitungszeiten erlauben oder den Materialfluss ändern (Lefebvre et al. 2004). Mit der Integration dieser Elemente steigt das Komplexitätslevel während der Modellierung. Die Möglichkeiten einer numerischen Lösung werden reduziert (Freitag 2005).

Der zweite Modelltyp sind ereignisdiskrete Modelle, wobei sich die Modellvariablen sprunghaft und zu variablen Zeitpunkten ändern. Bei diesem Typ können stochastische Ereignisse eingebettet werden. Die Basis hierfür ist die Warteschlangentheorie, die aus Warteschlangen, Bedienstationen, Ereignislisten und einer virtuellen Uhr besteht (Baum 2013). Im Bereich der produktionslogistischen Simulation sind dies die gängigsten Modelle. Mit diesem Modelltyp lassen sich detaillierte Abbildungen von realen Systemen nachbilden (Page und Liebert 1991). Aufgrund der Möglichkeit, reale Ereignisse in der Simulation abzubilden, lassen sich gute Näherungen über Produktionszustände sowie Prognosen in Echtzeit berechnen und Optimierungen durchführen (Schulz 2018). Dank der Modellierung von dynamischen Elementen, z. B. von Wartungszeiten und der seriellen Kopplung von Materialempfängern, steigt der Aufwand während der Modellgenerierung sehr stark an.

Der dritte Modelltyp kombiniert die Eigenschaften der kontinuierlichen und ereignisdiskreten Modelle. Bei hybriden Modellen können unstetige Funktionen, wie Umschaltvorgänge, implementiert werden. Im Trichtermodell, welches ein hybrides Modell ist (vgl. Abschnitt 2.4.3), werden kontinuierlich Aufträge in einem Ar-

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

beitssystem angenommen werden (Freitag 2005). Die Nutzung dieser Möglichkeiten setzt allerdings voraus, dass eine Simulation die Umwandlungen zwischen diskreten und kontinuierlichen Größen gewährleistet. Lunze (2003) hat für eine solche Umwandlung Mechanismen zum Zusammenwirken der Teilmodelle vorgestellt (Lunze 2003). Mit den erläuterten Injektoren und quantisierten Funktionen können dynamische Modelle aufgebaut werden. So erlauben die hybriden Modelle die Nutzung von beispielsweise nichtlinearen Elementen zur Modellierung von komplexen Zusammenhängen (Punkte León und Kiencke 2013; Janschek 2010). Durch die Aufteilung der Elemente in verschiedene Teilmodelle eröffnet sich die Möglichkeit, sowohl eine analytische als auch eine simulative Untersuchung durchzuführen (Artur Schmidt und Thorsten Pawletta 2014).

Nach sorgfältiger Betrachtung der relevanten Merkmale wird für die vorliegende Arbeit eine hybride Modellierung mit dynamischen Eigenschaften gewählt (vgl. Abbildung 34). Nach der Auswahl der geeigneten Modellierungsmethode und der Simulationsart erfolgt in den weiteren Abschnitten die Entwicklung der Modelle für die Fertigungsressourcen.

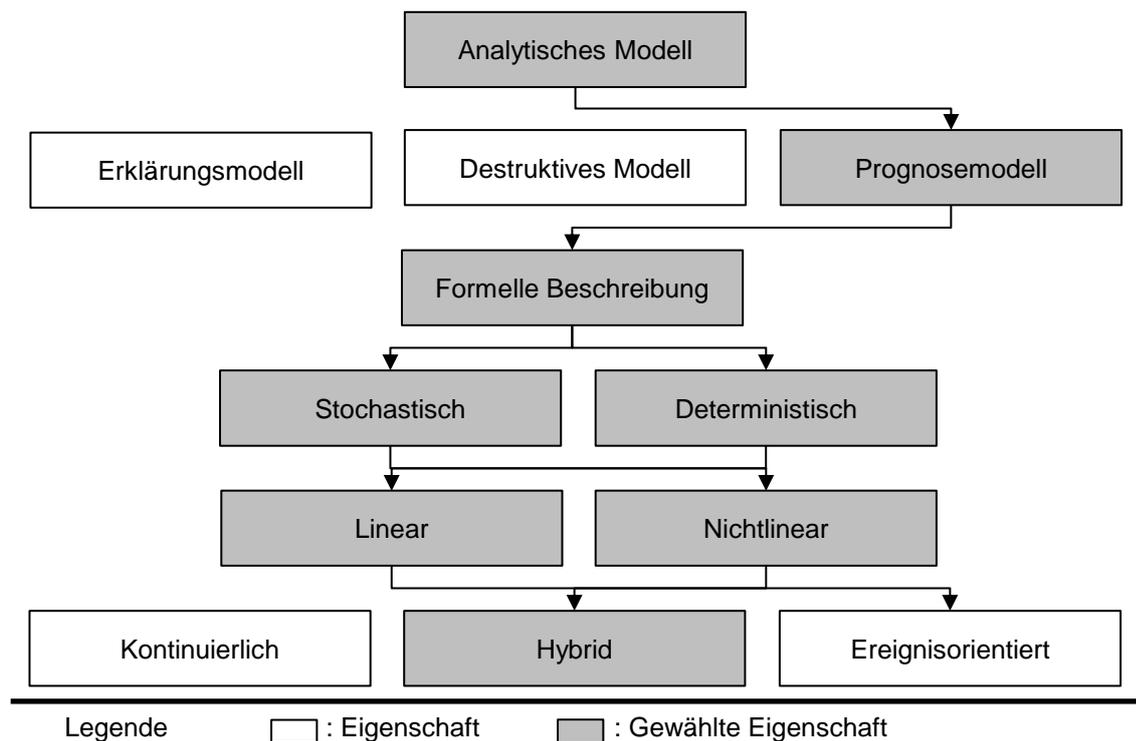


Abbildung 34: Modellklassifizierung für die regelungstechnische Nutzung

7.3.2 Arbeitssystem

Das Arbeitssystem stellt ein kontinuierliches regelungstechnisches Streckenmodell dar (vgl. Abschnitt 3.2.4). Wie bereits in Abschnitt 3.2.4 erläutert, kann dieses Modell unter dem Aspekt der Produktionsregelung in ein kontinuierliches Modell transformiert werden (Duffie et al. 2014; Knollmann et al. 2014; Duffie und Shi 2010; Kim und Duffie 2005; Breithaupt 2001; Petermann 1996). Es besteht allerdings noch Handlungsbedarf bei der realistischen Beschreibung des Arbeitssystems (vgl. Abschnitt 3.2.4). Das in der Arbeit entwickelte Modell baut direkt auf den Arbeiten von Petermann (1996) und Breithaupt (2001) auf (vgl. Abschnitt 3.2.4). Die Erweiterung des Arbeitssystemmodells ergibt sich durch die Integration folgender drei neuen Teilmodelle:

- Verschleißmodell
- Wartungsmodell
- Arbeitssysteme mit variabler Leistungskennlinie

Sowohl eine Literaturrecherche als auch die Arbeiten im Forschungsprojekt Open-Serv4P mit den beteiligten Industriepartnern zeigen, dass die Aspekte Verschleiß und Wartung in der Modellierung bisher nicht ausreichend berücksichtigt werden (Monostori et al. 2016; Berger et al. 2016b). Zudem ist die Variabilität der Leistung von Arbeitssystemen in den bisherigen Arbeiten nicht berücksichtigt. In den folgenden Abschnitten werden die drei Teilmodelle detailliert reflektiert. Abbildung 36 zeigt die Zusammenführung aller drei Teilmodelle.

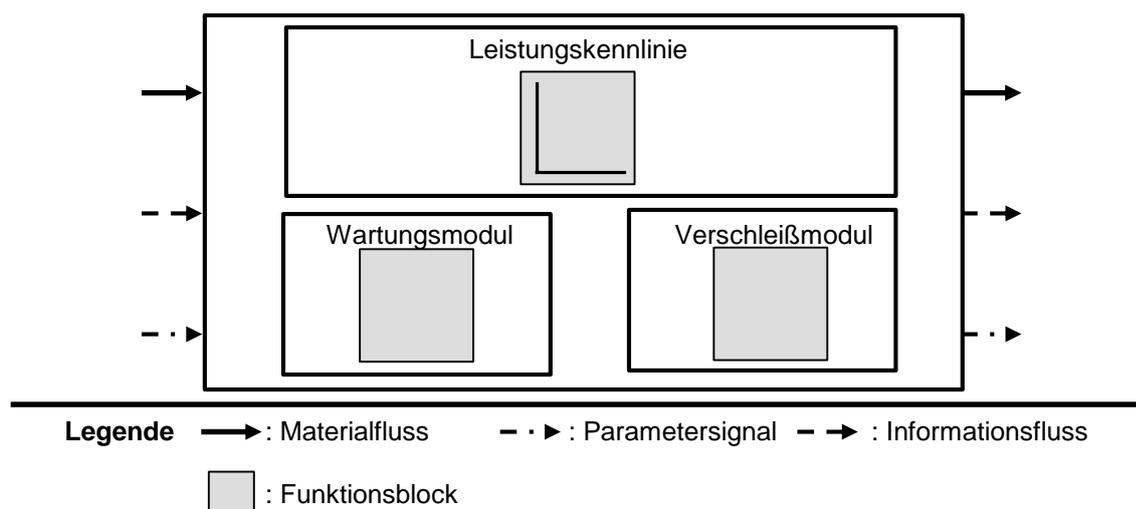


Abbildung 36: Übersicht zum Arbeitssystemmodell

7.3.2.1 Verschleißmodell

Der Verschleiß an Anlagen und Maschinen ist einer der maßgeblichen Faktoren für einen Ausfall bzw. die Reduzierung der Arbeitsgeschwindigkeit (Sorko und Irsa 2019; Zhai und Reinhart 2018; Brecher et al. 2014; Dyckhoff und Spengler 2010). Der Verschleiß hat somit einen großen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit eines Arbeitssystems und wird in einem eigenen Teilmodell berücksichtigt. Die Informationen zum Verschleißverhalten der Maschine können aus externen Maschinenmodellen oder Informationssystemen des CPS-Arbeitssystems (vgl. Abschnitt 2.2) entnommen werden (Lucke et al. 2015). Die entwickelte Architektur zur Produktionsregelung (vgl. Abschnitt 5.2) berücksichtigt diesen Aspekt. In Tabelle 7 sind die zur Modellierung benötigten Parameter zusammengefasst.

Tabelle 7: Beschreibung der Modellparameter des Teilmodells Verschleiß

		Parameter des Verschleißmodells	
Kategorie	Bezeichnung	Beschreibung	Abkürzung
Dynamische Eingänge	Verschleiß	Genereller Verschleiß des Arbeitssystems	V
	Aktuelle Maschinenleistung	Wert der aktuellen Maschinenleistung des Arbeitssystems	ML_{akt}
	Belastungsspezifischer Verschleiß je Arbeitssystem	Zusätzlicher Verschleiß hervorgerufen durch die Leistung des Arbeitssystems	V_{AS}
	Wartung	Eingangssignal zur Zurücksetzung des Verschleißintegrals nach Wartung	W
Dynamischer Ausgang	Aktueller Verschleiß	Normierter Wert zur Reduzierung der Maschinenleistung	V_{akt}

Die Informationen zum generellen Verschleiß finden sich im Parameter V . In Abhängigkeit der Belastung des Arbeitssystems können skalare Werte oder Vektoren als Parameter V_{AS} in Kombination zur aktuellen Maschinenleistung ML_{akt} hinzugefügt werden. Diese beiden Werte werden im Modell mit Hilfe eines Integrationsglieds zu einem Wert summiert. Der Parametereingang W setzt den Verschleiß des Arbeitssystems zurück. Der Ausgangsparameter V_{akt} ist das Resultat

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

aus den aktuellen Eingängen und kann im Arbeitssystemmodell weiterverarbeitet werden (vgl. Abschnitt 7.3.2.3).

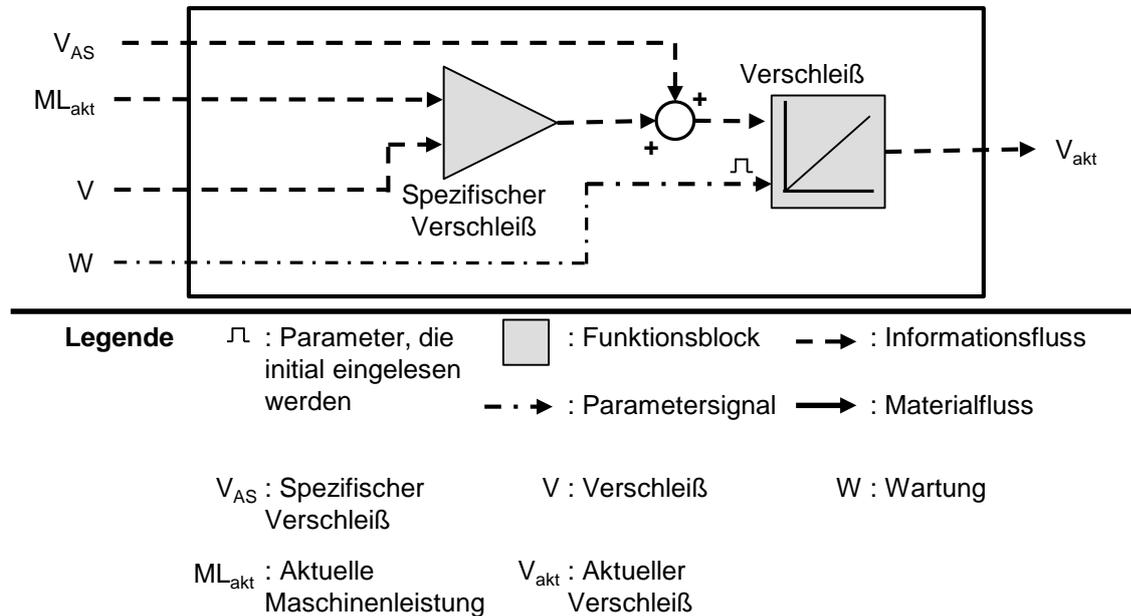


Abbildung 37: Vereinfachte Darstellung des Verschleißmoduls in Arbeitssystemen

7.3.2.2 Wartungsmodell

Die Wartung von Maschinen ist ein wesentlicher Bestandteil von Arbeitssystemen, da sie dazu dient, den ordnungsgemäßen Betrieb der Maschinen und die Produktionsleistung aufrechtzuerhalten. In diesem Modell können Wartungs- und Umbauarbeiten berücksichtigt werden. In Tabelle 8 finden sich die nötigen Parameter zur Berücksichtigung dieses Modells in einem Arbeitssystem.

Tabelle 8: Beschreibung der Modellparameter des Teilmodells Wartung

Parameter des Wartungsmodells			
Kategorie	Bezeichnung	Beschreibung	Abkürzung
Dynamische Eingänge	Wartung	Signal zur Aktivierung der Wartung an einem Arbeitssystem, hervorgerufen durch das Verschleißmodul	W
	Umbauarbeiten	Signal für Umbauarbeiten an einem Arbeitssystem	U_A

7.3 Modellbeschreibung der Fertigungsressourcen

	Dauer der Arbeit	Vorgegebene Zeit für Wartung oder der Umbauarbeiten	W_d
Dynamischer Ausgang	Aktive Wartung	Signal für aktive Wartung	W_{akt}

Das Auslösen der Wartungsarbeit (W_{akt}) reagiert auf einen aktuellen Verschleiß des Arbeitssystems sowie auf ein externes Signal für z. B. Umbauarbeiten. Die Dauer der Arbeiten wird mittels einer Integrationsfunktion im Modell „Wartung“ angepasst und mit einer Umwandlung zu einem Signal Wartung aktiv verarbeitet. Während der Wartungsarbeiten ist die Leistung des Arbeitssystems gleich Null.

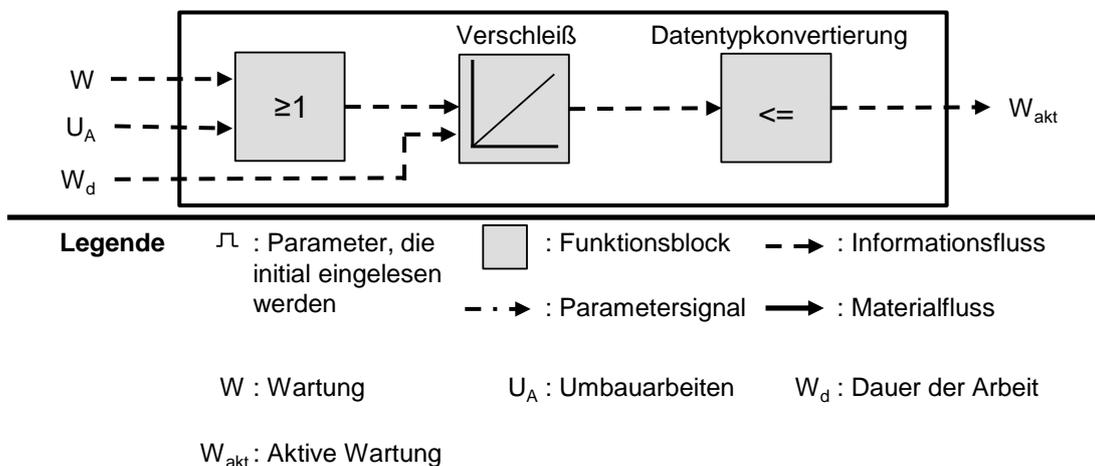


Abbildung 38: Vereinfachte Darstellung des Teilmodells Wartung bei Arbeitssystemen

7.3.2.3 Arbeitssysteme mit variabler Leistungskennlinie

Die Leistungskennlinie (LKL) im Arbeitssystem (vgl. Abbildung 39) beschreibt das Abarbeitungsverhalten zwischen dem Auftragszugang und -abgang und ist somit ein elementarer Baustein eines produktionsregelungstechnischen Modells (Nyhuis und Wiendahl 2012). Zur Verknüpfung der Leistungskennlinien mit den Fertigungsressourcen und den beschriebenen Teilmodellen sind mathematische Umformungen im Arbeitssystem in Form von Funktionsblöcken notwendig. Im Weiteren wird zunächst der Funktionsblock Leistungskennlinie beschrieben und im Anschluss erfolgt die Erläuterung zu den mathematischen Umformungen der Eingangssignale in einem Arbeitssystem.

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

Um den Funktionsblock "Leistungskennlinien" in verschiedenen Arbeitssystemen nutzen zu können, wird eine normierte Leistungskennlinie verwendet. Der Einsatz normierter Kennlinien bietet den Vorteil, dass diese unabhängig von spezifischen Randbedingungen des Arbeitssystems, wie der Produktionsleistung, angewendet werden können (vgl. Abschnitt 2.4.3). Durch die Normierung werden die Leistungskennlinien auf eine einheitliche Skala gebracht, wodurch sie vergleichbar und übertragbar werden. Dadurch ist es möglich, die Kennlinien auf verschiedene Arbeitsprozesse anzuwenden (Ludwig und Nyhuis 1992).

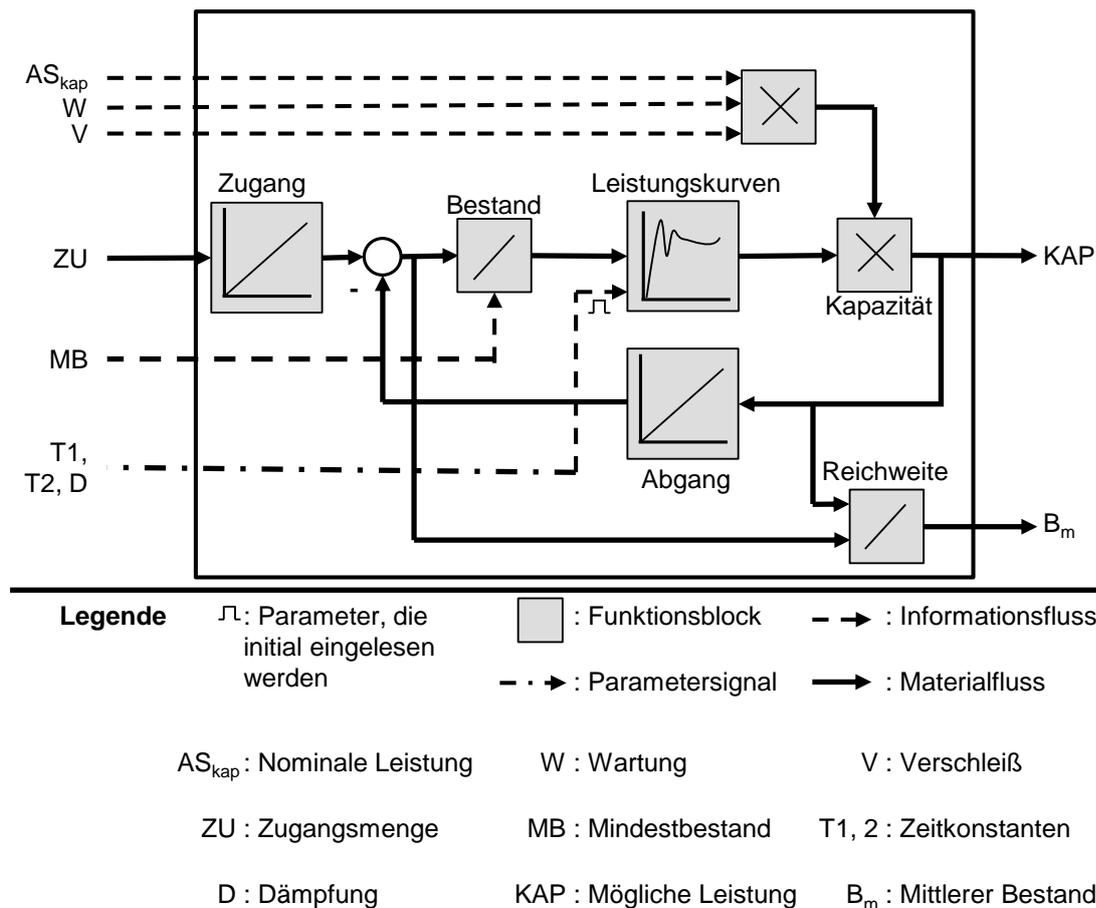


Abbildung 39: Vereinfachte Darstellung des Modells zu variablen Leistungskennlinien bei Arbeitssystemen

Bei der Modellierung des Abarbeitungsverhaltens ergibt sich eine normierte Leistungskennlinie, die sich aus den zwei idealen Betriebszuständen

- mittlere Leistung (ML) und
- mittlerer Bestand (MB)

zusammensetzt (siehe Abbildung 40, links).

Die Leistungskennlinien werden standardisiert und unabhängig von der Maschine in der vorliegenden Arbeit durchgängig mit einer Übertragungsfunktion zweiter Ordnung (PT2-Glied) modelliert (vgl. Abbildung 40, rechts). Dieses Vorgehen bei der Modellierung unterscheidet sich gegenüber Duffie und Falu (2002), Breithaupt (2001) sowie Petermann (1996) dadurch, dass es eine kontinuierliche Modellierung ermöglicht und die Leistungskennlinie durchgängig mathematisch beschrieben werden kann. Darüber hinaus kann das Modell mit einem PT2-Glied präziser auf Produktionsereignisse reagieren. Die Reaktionen des Arbeitssystems müssen nicht zwangsläufig in einer vorher definierten, z. B. Lookup-Tabelle, beschrieben werden (Petermann 1996). Durch die Modellierung mittels PT2-Glieder ergibt sich somit eine realistischere Abbildung von Arbeitssystemen für Produktionsprozesse, wie bspw. Fräs-, Bohr- und Drehmaschinen (Berger et al. 2018a).

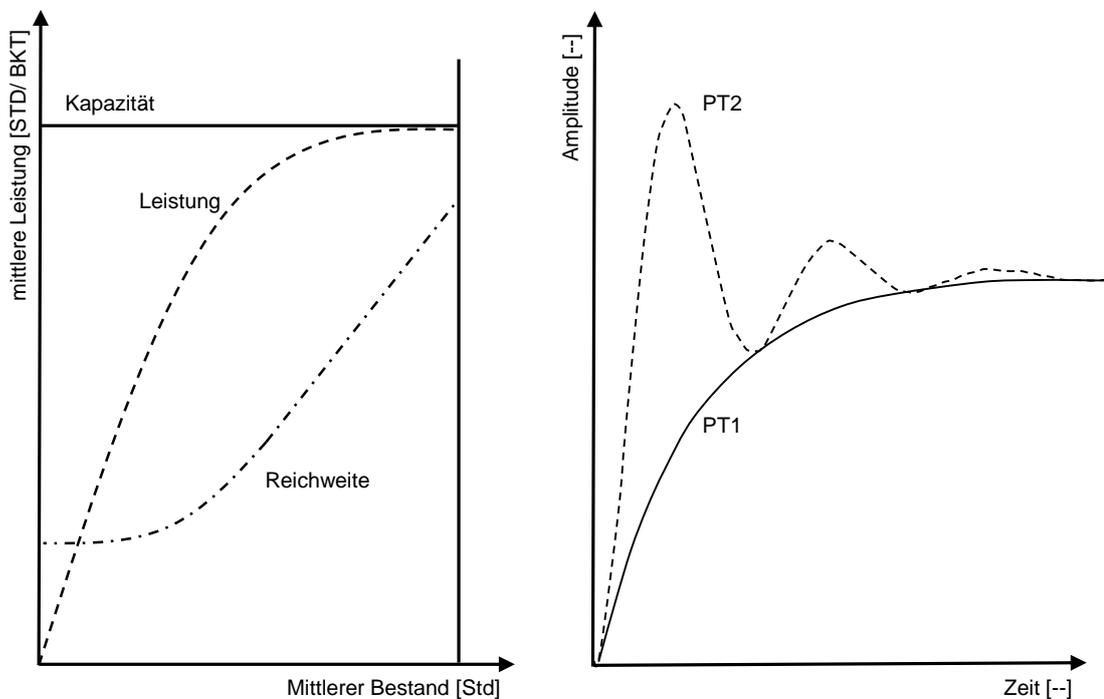


Abbildung 40: Darstellungen einer Produktionskennlinie (links) und zwei Sprungantworten eines PT1-Glieds bzw. eines PT2-Glieds (rechts)

Um PT2-Glieder zur Modellierung von Leistungskennlinien von Arbeitssystemen zu verwenden, ist es erforderlich, die Modellparameter Dämpfungsfaktor (D) und Zeitkonstante (T) zu bestimmen (vgl. Formel (11)). Der Dämpfungsfaktor beeinflusst das Verhalten der Leistungskennlinie und gibt an, wie stark das System auf äußere Einflüsse reagiert. Die Zeitkonstante gibt an, wie lange das System benötigt, um auf eine Veränderung der Eingangsgröße zu reagieren. Es bestimmt somit

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

die Reaktionsgeschwindigkeit der Leistungskennlinie. Durch die Anpassung dieser Parameter kann die Leistungskennlinie entsprechend den Anforderungen und Eigenschaften des Arbeitssystems modelliert werden.

$$G(s)_{AS} = \frac{K_{AS}}{T_{AS}^2 * s^2 + 2 * D_{AS} * T_{AS} * s + 1} \quad (11)$$

mit s Komplexer Frequenzparameter

Mit dem Faktor der K_{AS} lassen sich Belastungsstreuungen und Kapazitätsanpassungen in dem Modell berücksichtigen.

In der vorliegenden Arbeit wird die Zeitprozentkennwertmethode zur Identifikation der Zeitkonstanten T von Übertragungsfunktionen verwendet. Diese Methode basiert auf der Analyse des zeitlichen Verlaufs der Systemantwort. Für weitere heuristische Methoden zur Identifikation der Zeitkonstante, wie das Wendetangentenverfahren, die T-Summen-Regel und das Verfahren nach Ziegler-Nichols, wird auf weiterführende Literatur, wie beispielsweise Föllinger (2016), Lutz und Wendt (2005) und Kuhn (1995b), verwiesen. Der Vorteil der Zeitprozentkennwertmethode gegenüber grafischen Methoden, wie dem Wendetangentenverfahren, ist die Reduzierung von Ablesefehlern und die Möglichkeit einer automatisierten Durchführung des Verfahrens in einem eigenständigen Algorithmus (Unbehauen 2007; Makarov 1994; Latzel 1993).

Die Anwendung der Zeitprozentkennwertmethode zur Identifikation der Zeitkonstante T erfordert als Systemantwort eine Leistungskennlinie des Arbeitssystems über den gesamten relevanten Zeitbereich, d.h. vom Stillstand bis zum Erreichen der maximalen Produktionsleistung. Diese Leistungskennlinie gibt Aufschluss über den zeitlichen Verlauf der Leistung des Systems in Abhängigkeit von der Zeit. Aus dem Verlauf der Kennlinie werden die Leistungswerte bei 10 %, 50 % und 90 % des maximalen Wertes erfasst und in die Formel (12) eingesetzt. Abbildung 41 zeigt die grafische Darstellung der Zeitprozentwertmethode.

Die benötigten Zeitprozentwerte bei τ_{10} , τ_{50} und τ_{90} zur Berechnung der Zeitkonstante T_{AS} können der Fachliteratur, wie bspw. Zacher und Reuter (2017), entnommen werden.

$$T_{AS} = \frac{1}{3} \left(\frac{t_{10}}{\tau_{10}} + \frac{t_{50}}{\tau_{50}} + \frac{t_{90}}{\tau_{90}} \right) \quad (12)$$

Mit der Ausführung dieser Methode kann die Zeitkonstante aller Arbeitssysteme bestimmt werden.

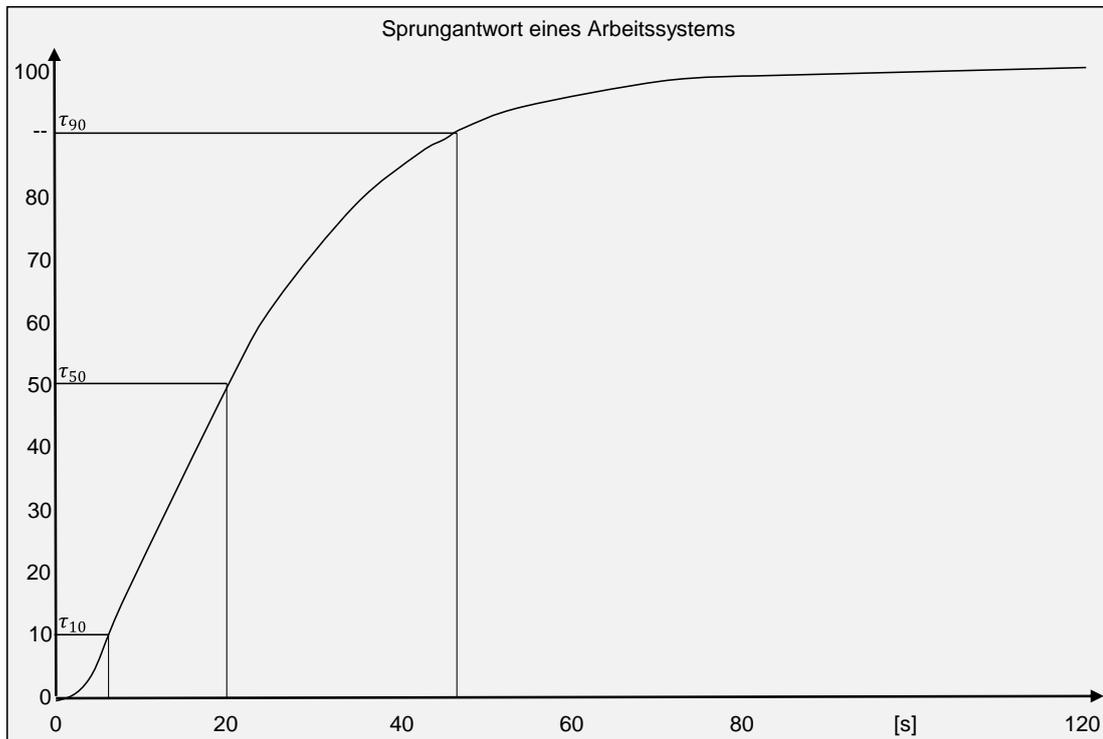


Abbildung 41: Grafische Darstellung der Zeitprozentwertmethode

Der zweite zu ermittelnde Parameter ist der Dämpfungsfaktor D . Dieser Faktor lässt sich auf Grundlage von empirischen Informationen ermitteln, z. B. bei der Inbetriebnahme der Maschine, oder aus historischen Produktionsdaten ableiten. Als Standardwert kann für den Dämpfungsfaktor $D = 1$ angenommen werden. Dieser Wert entspricht in der Literatur dem aperiodischen Grenzfall der Regelungstechnik und dem ermittelten Systemverhalten von Arbeitssystemen (Nyhuis und Wiendahl 2012). Der Dämpfungsfaktor bzw. der in der Literatur beschriebene Streckfaktor (α) (Nyhuis und Wiendahl 2012) kann für PT2-Glieder als Standardwert übernommen werden (Berger et al. 2018a).

Um die spezifische Dämpfung jedes Arbeitssystems zu berechnen, werden Methoden aus der Regelungstechnik (Föllinger 2016; Lutz und Wendt 2005) sowie der Produktionskennlinienberechnung (Nyhuis und Wiendahl 2012) angewendet.

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

Grundlage der Berechnung der Dämpfung eines Arbeitssystems in dem folgenden Vorgehen (vgl. Abbildung 42) sind die drei Kategorien der Dämpfung für technische Arbeitssysteme:

- $0 < D < 1$, gedämpfte Schwingung
- $D = 1$, aperiodischer Grenzfall
- $D > 1$, aperiodische Lösung.

Das Ergebnis der Berechnung ist eine spezifische Leistungskurve mit Dämpfung für jedes Arbeitssystem. Die berechnete Leistungskurve kann mit der Auswertung der historischen und aktuellen Daten der Produktion, periodisch oder ereignisbasiert, aktualisiert werden. Die benötigten Berechnungsformeln und die Werte sind in den Public Cloud Services zur Berechnung der Dämpfung hinterlegt.

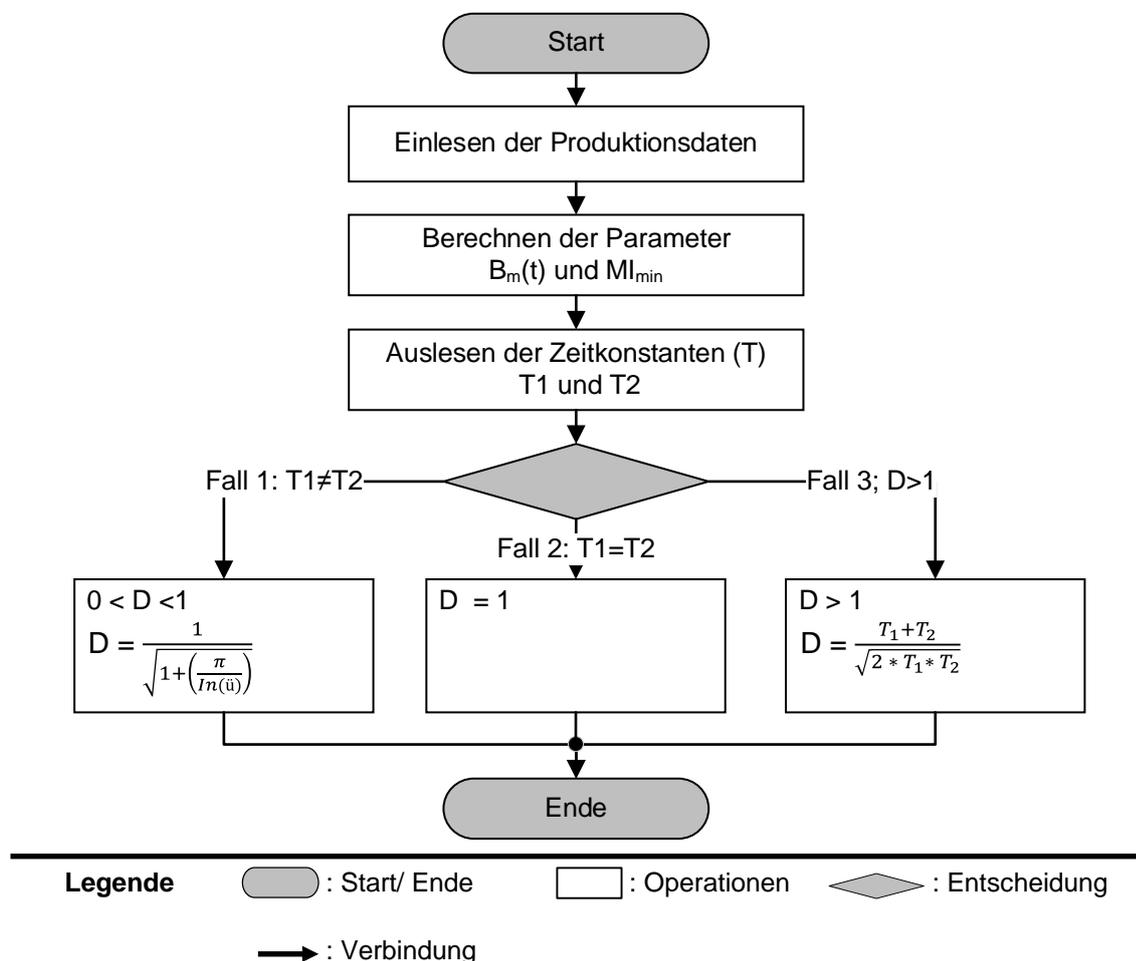


Abbildung 42: Vorgehen zur Berechnung der Dämpfung D eines Arbeitssystems (Darstellung nach DIN 66001)

Der zweite Aspekt der Arbeitssystemmodelle berücksichtigt die notwendige mathematische Verarbeitung der drei Eingangsgrößen zur Auftragsabarbeitung. Der relative Bestand wird im Arbeitssystemmodell in dem Funktionsblock relativer Bestand B_{rel} durchgängig berechnet und ist somit das Eingangssignal für die Leistungskennlinie des Arbeitssystems. Zur Berechnung sind die Eingangsgrößen *idealer Mindestbestand* (BI_{min}) und *mittlerer Bestand* ($B_m(t)$) *notwendig*.

$$B_{rel} = \frac{B_m(t)}{BI_{min}} \quad (13)$$

mit	B_{rel}	relativer Bestand [%]
	$B_m(t)$	mittlerer Bestand [Std]
	BI_{min}	idealer Mindestbestand [Std]

Der o.g. Parameter BI_{min} beschreibt den idealen Mindestbestand an einem Arbeitssystem. Mit diesem Bestand können Schwankungen im Materialfluss aufgefangen werden. Die Berechnung dieses Parameters ist in der Literatur, beispielweise bei Nyhuis (2008b), vollständig diskutiert und ist im Rahmen dieser Arbeit in der Produktionsdatenbank (vgl. Abschnitt 5.2.5) für jedes Arbeitssystem abgespeichert.

Mit dem Parameter Kapazität KAP_{max} und der Ausgangsgröße der Leistungskennlinie wird durch eine Multiplikation die Ist-Leistung berechnet. Aus dieser Größe lässt sich die Anzahl der gefertigten Teile berechnen (vgl. Abbildung 39). Bei der Berechnung der maximalen Kapazität des Arbeitssystems wird die Leistungsformel von Nyhuis und Wiendahl (2012) und Nyhuis (2008b) um den Parameter V_{akt} erweitert (vgl. Formel (14)). Dies erlaubt eine dynamische Abbildung des aktuellen Arbeitssystemzustandes und der anstehenden Wartung bzw. des Rüstungsaufwands.

$$KAP_{max} = \min\{BKAP, PKAP_n, V_{akt}\} \quad (14)$$

mit	KAP_{max}	Maximal mögliche Leistung [Std/BKT]
	$BKAP_v$	Verfügbare Betriebsmittelkapazität [Std/BKT]
	$PKAP_n$	Nutzbare Personalkapazität [Std/BKT]
	V_{akt}	Arbeitssystemzustand [Std/BKT]

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

Zuletzt erfolgt mit Hilfe der zwei Integrationsglieder Zugang und Abgang eine auftragsbezogene Berechnung des Bestandes in einem Arbeitssystem. Aus der Subtraktion beider Größen ergibt sich ein mittlerer Bestand (B_m). In Tabelle 9 ist eine Zusammenfassung der Parameter enthalten.

Tabelle 9: Beschreibung der Modellparameter des Arbeitssystems

Modellparameter der Arbeitssystem			
Kategorie	Bezeichnung	Beschreibung	Abkürzung
Dynamische Eingänge	Nominale Leistung	Angabe zur nominalen Leistung des Arbeitssystems	AS _{kap}
	Wartung	Status der Wartung am Arbeitssystem	W
	Verschleiß	Status des Verschleißes am jeweiligen Arbeitssystem	V
	Zugangsmenge	Aktuelle Zugangsmenge zum Arbeitssystem	ZU
Dynamische Ausgänge	Mögliche Leistung	Angabe zur Ist-Leistung des Arbeitssystems	KAP
	Mittlerer Bestand	Dieser Parameter berechnet sich über die Summe der Einzelbestände pro Zeitabschnitt (z. B. pro Tag) und wird durch die Anzahl der Zeitabschnitte im Bezugszeitraum dividiert.	B _m
Statische Parameter	Mindestbestand	Mindestbestand für das Arbeitssystem	MB
	Zeitkonstante 1	Spezifische Zeitkonstante 1 zur Berechnung der Leistungskurve	T1
	Zeitkonstante 2	Spezifische Zeitkonstante 2 zur Berechnung der Leistungskurve	T2
	Dämpfung	Spezifische Dämpfung des Arbeitssystems	D

7.3.3 Lagereinheit

Die Lagereinheiten wurden bislang in den Arbeiten zur Produktionsregelung bei der Modellierung kaum berücksichtigt. Wie bei der Modellierung der Arbeitssysteme werden ausschließlich Parameter berücksichtigt, die aus Sicht der Produktionsregelung relevant sind. Die dynamischen Ein- und Ausgangsparameter sowie die statischen Parameter sind in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 10: Beschreibung der Modellparameter der Lagereinheiten

Modellparameter der Lagereinheiten			
Kategorie	Bezeichnung	Beschreibung	Abkürzung
Dynamischer Eingang	Lagerzugangsmenge	Die Lagerzugangsmenge von Arbeitssystemen oder Transporteinheiten	LZ
Dynamische Ausgänge	Lagerabgangsmenge	Die Lagerabgangsmenge von Arbeitssystemen oder Transporteinheiten	LA
	Lagerbestand	Aktueller Bestand in einer Lagereinheit	LB _{Ist}
Statische Parameter	Initialbestand Lagereinheit	Bestand in der Lagereinheit zum Start der Berechnung	IB
	Mittlerer Lieferverzug	Lieferverzug in einer Lagereinheit	LV _m
	Maximaler Lagerbestand	Beschreibt den maximalen Bestand in einer Lagereinheit	LB _{Max}

Abbildung 43 zeigt die Weiterentwicklung der bestehenden Ansätze zur Modellierung von Lagereinheiten auf Basis eines Totzeitgliedes und zwei Integrationsgliedern (vgl. Abschnitt 2.5.2).

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

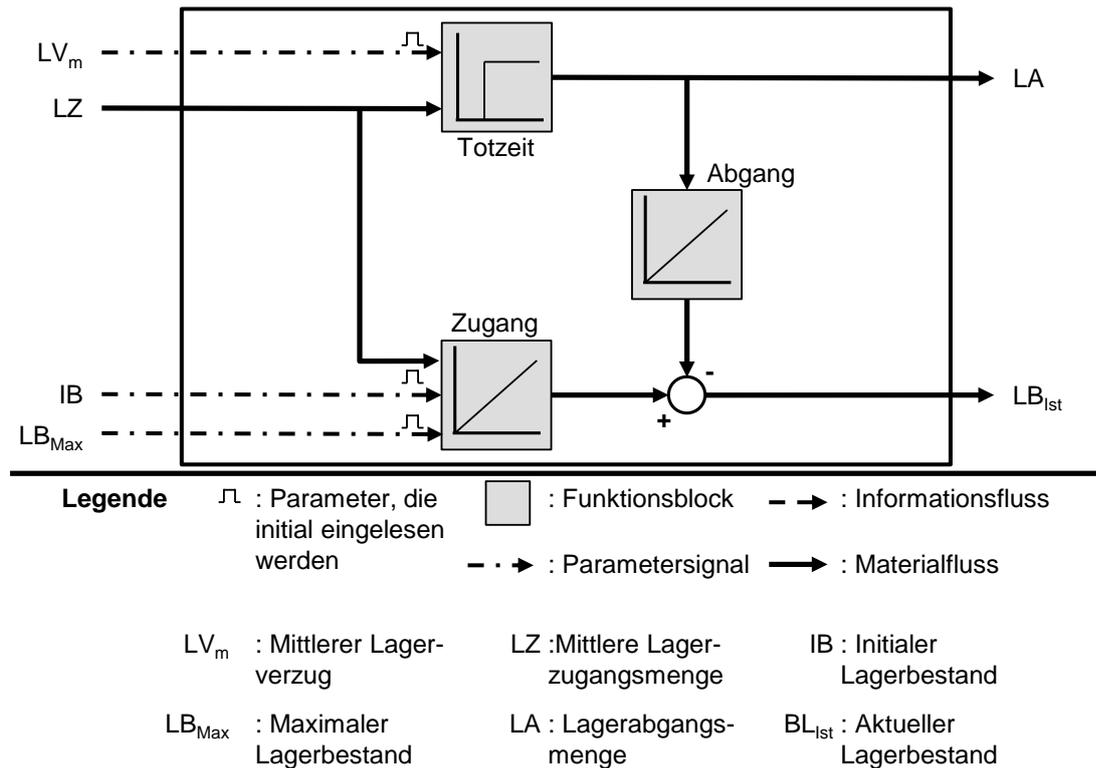


Abbildung 43: Vereinfachte Darstellung des Modells für eine Lagereinheit

Die Änderungen in der Lagerzugangsmenge (LZ) zeigen erst nach der Zeitspanne LV_m Wirkung auf den Lagerabgang (LA). Die Totzeit entspricht im Lagereinheitsmodell der LV_m , die zum Start der Berechnung eingelesen wird. Ebenfalls werden zum Start der Berechnung die Parameter zum initialen Lagerbestand (IB) und maximalen Lagerbestand (LB_{max}) berücksichtigt. Die Berechnung des auftragsbezogenen Zu- und Abgangs erfolgt weiterhin über die Integrationsglieder. Durch die Subtraktion beider Größen berechnet sich der aktuelle Bestand (LB_{ist}) in der Lagereinheit.

7.3.4 Transporteinheit

Wie die Lagereinheiten, wurde die Modellierung der Transporteinheiten in vorausgehenden Arbeiten nicht fokussiert. Zur Bestimmung der Parameter zur Modellbildung ist eine Orientierung an der Arbeit von Nyhuis und Wiendahl (2012) möglich. In Tabelle 11 sind die Modellparameter der drei Transporteinheiten aufgelistet.

Tabelle 11: Beschreibung der Modellparameter der Transporteinheiten

Modellparameter der Transporteinheiten			
Kategorie	Bezeichnung	Beschreibung	Abkürzung
Dynamische Eingänge	Transport Zuflussmenge	Zuflussmenge auf die Transporteinheit	TZM
	Mittlere Transportdauer	Dauer des Transports zwischen zwei Stationen	TT _m
	Mittlere Be- und Entladedauer	Dauer zur Be- und Entladung der Transporteinheit	TZ _{be,ent}
Dynamischer Ausgang	Transport Abflussmenge	Die Abgangsmenge der Transporteinheit	TAM
Statische Parameter	Initialbestand an Transporteinheit	Bestand in der Transporteinheit bei Start der Berechnung	IB _T
	Maximale Transportmenge	Maximaler Bestand in einer Transporteinheit	BL _{Max}

Das entwickelte Modell von Transporteinheiten ist in vereinfachter Weise in Abbildung 44 dargestellt. Eine Transporteinheit besteht aus zwei Totzeit- und zwei Integrationsgliedern. Durch die Integration von zwei Totzeitgliedern können die Transportzeit (TZM) und die Summe der Be- und Entladezeit ($TZ_{be,ent}$) einzeln, z. B. je Arbeitssystem, in der Produktionsdatenbank hinterlegt werden. Die zwei Integralfunktionen in den Lagereinheiten summieren die Zu- und Abflussmenge auf die Transporteinheit. Sollte ein Bestand zum Start der Simulation auf der Transporteinheit vorhanden sein, kann dies mit dem Parameter ib_T berücksichtigt werden. Die Modellparameter der Transporteinheit werden maßgeblich durch die Art und Anzahl der eingesetzten Transportmittel beeinflusst und weniger durch den Verschleiß. Aus diesem Grund entfällt die Modellierung von Verschleiß bei den Transporteinheiten.

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

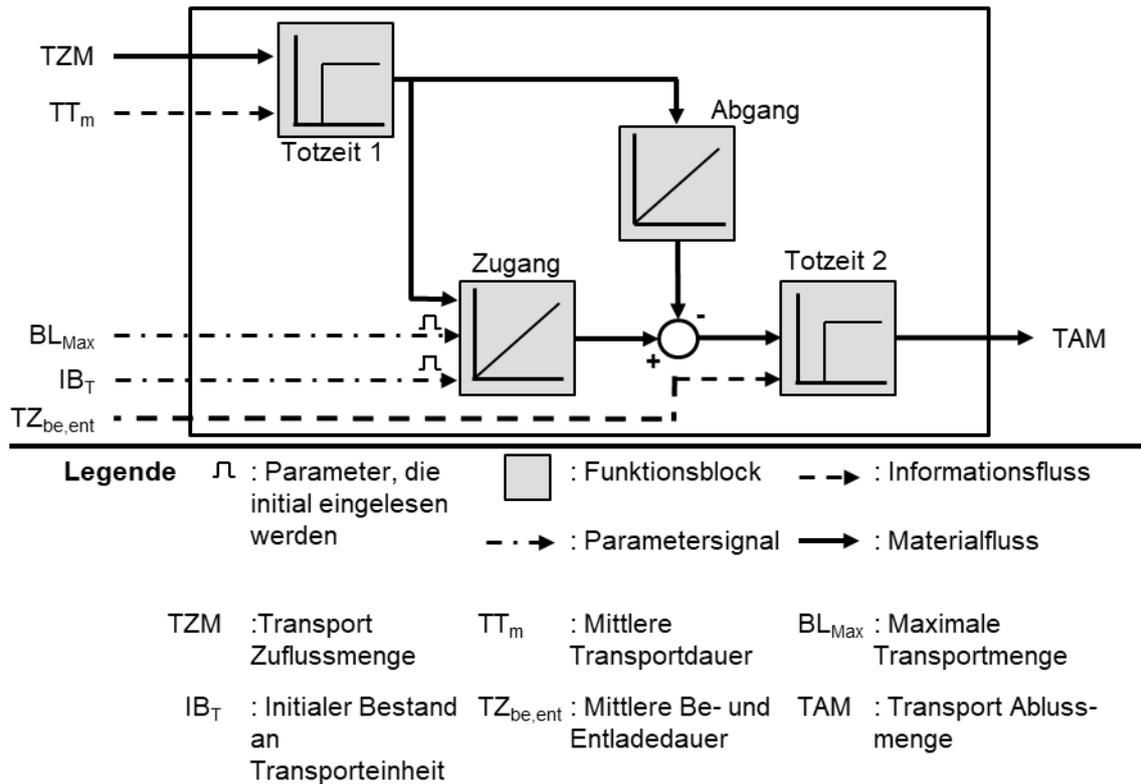


Abbildung 44: Vereinfachte Darstellung des Modells für eine Transporteinheit

7.4 Produktionsmodellbildung

7.4.1 Materialflussgerechte Modellierung

In Abschnitt 7.3 wurden die drei Grundmodelle für Arbeitssysteme, Lager- und Transporteinheit der Fertigung vorgestellt. Nun erfolgt die Verknüpfung der drei Modelle über den Materialfluss zu einem Produktionssystem. Hierzu besitzen die Modelle entsprechende Ein- und Ausgänge (Duffie et al. 2008).

Zur Modellierung eines Produktionssystems sind zudem noch Mechanismen nötig, um einen variablen Materialfluss abzubilden (Breithaupt 2001; Kudlich 2000; Haller 1999). Zur Verknüpfung der Modelle über den Materialfluss ergeben sich in der vorliegenden Arbeit drei Arten, die in Abbildung 45 vergleichend dargestellt sind.

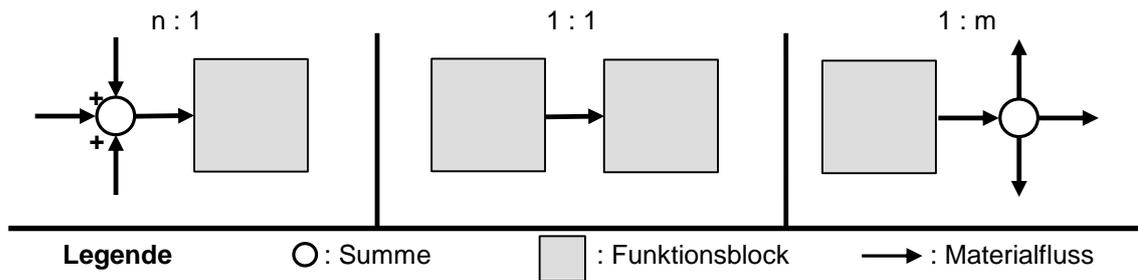


Abbildung 45: Verknüpfungsarten des Materialflusses

Bei der Verknüpfungsart $n : 1$ summiert sich der Materialfluss von den vorhergehenden Systemen in einem der drei Teilmodelle (vgl. Formel (15)). Diese Art der Verknüpfung findet sich z. B. bei Montageprozessen.

$$ZU_n = \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

mit	ZU	Zugang
	n	Endwert
	i	Laufvariable
	x_i	Funktion bezüglich der Laufvariable

Im Fall der Verknüpfung $1 : 1$ wird der Materialfluss eines vorhergehenden Modells direkt mit dem einer nachfolgenden Fertigungsressource verknüpft (vgl. Formel (16)). Dies ist der einfachste Fall und beschreibt beispielsweise eine Fließfertigung.

$$ZU = AB \quad (16)$$

mit	ZU	Zugang [-]
	AB	Abgang [-]

Zuletzt folgt der $1 : m$ Verknüpfungsfall wobei, sich der Materialfluss in einem bestimmten Verhältnis auf die Fertigungsressourcen aufteilt (vgl. Formel (17)). So können z. B. Standardteile auf unterschiedliche Produktionslinien verteilt werden.

$$AB_m = \frac{ZU}{m} \quad (17)$$

mit	AB	Abgang [-]
	ZU	Zugang [-]
	m	Anzahl [-]

7.4.2 Vernetzung der Produktionsmodelle

Nach der Darstellung der Verknüpfung des Materialflusses zwischen den Modellen erfolgt in einem weiteren Schritt die Vernetzung der Produktions-IT auf Basis der Informationsflussebene. Mit diesem weiteren Schritt lässt sich ein CPPS abbilden. Durch die Nutzung der Verwaltungsschale und der Referenzarchitektur werden aktuelle Zustände der realen Produktion in der Modellierung berücksichtigt. Dies gilt auch für initiale Bedingungen, wie Bestände in den Lagern, die (vgl. Abschnitt 5.2) über die Parameterebene aufgegriffen werden.

Hierzu wurden zwei Ebenen zur Verarbeitung der internen und externen Signale sowie der Parameter vorgesehen. Die Informationen über die Zustände stammen von den modellierten Fertigungsressourcen (F), aus historischen Daten der Produktionsdatenbank (P) und den Public Clouds Services (vgl. *Tabelle 12*). Darüber hinaus wird unterschieden, ob es sich um eine ereignisbasierte (E), kontinuierliche (K) oder initiale (I) Kommunikationsart handelt.

Tabelle 12: Informationsquellen der Modelle

Informationsquellen der Fertigungsmodelle				
Modelltyp	Ebene (F/P)	Signal	Datenquelle	Art (E/K/I)
Arbeitssystem	P	AS _{KAP}	Produktionsdatenbank, Bereich transformierte Da- ten oder Public Clouds Service	K
	P	MB		K
	P	W		K
	P	V		K
	P	D		E
	P	T ₁		E
	P	T ₂		E
Lagereinheit	P	LB _{Max}	Produktionsdatenbank, Bereich transformierte Da- ten	I
	P	Ib _L		I
	I	LV _m		E
	I	LB _{Ist}		K
Transporteinheit	P	IB _T	Produktionsdatenbank, Bereich transformierte Da- ten	I
	P	BL _{Max}		I
	I	TT _m	Produktionsdatenbank, Bereich Arbeitsdaten	E
	I	TZ _{be,ent}		E

7.5 Fazit

In den vorhergehenden Abschnitten wurde die Modellierung der verschiedenen Typen von Fertigungsressourcen beschrieben. Im Abschnitt 7.2 wurde zunächst eine Kategorisierung der Modellarten durchgeführt. So konnten die Rahmenbedin-

7 Regelungsbasierte Produktionsmodelle

gungen für die weitere Modellierung der Ressourcen definiert werden. Im Abgleich mit den Anforderungen ist ein hybrides dynamisches Modell die Basis für die weitere Arbeit.

Die Entwicklung der Modelle für die Fertigungsressourcen in Abschnitt 7.3 bildet den Kern des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems. Die drei Modelle für Arbeitssysteme, Lager- und Transporteinheiten dienen der Abbildung realer Produktionsbedingungen und bilden die Grundlage für die Analysen hinsichtlich der Stabilität, die im folgenden Kapitel beschrieben werden. Die entwickelten Modelle sind miteinander durch die drei Ebenen Materialfluss, Informationsfluss und Parametersignal verbunden. Dadurch können sowohl diskrete als auch kontinuierliche Zustände in einem Modell berücksichtigt werden. Im entwickelten Arbeitssystemmodell ist es somit möglich, die kontinuierliche Leistungskurve mit einem PT-2 Glied zu modellieren. Zur Berechnung der Leistungskurve wurde ein Vorgehen entwickelt, das es ermöglicht, die benötigten Parameter auf Basis von historischen Daten oder Herstellerangaben herzuleiten.

Für die Verknüpfung des Materialflusses und der Informationssysteme der einzelnen Modelle wurden im Abschnitt Produktionsmodellbildung Vorgaben zur Verkettung konzipiert sowie Datenquellen definiert. Auf diese Weise können die Modelle die unterschiedlichen Informationsquellen nutzen und den Materialfluss mit den aktuellen Randbedingungen in der Simulation abbilden.

8 Zielgrößenorientierte Prognoseverfahren

8.1 Übersicht

Dieses Kapitel beschreibt die zielgrößenorientierte Prognose auf Grundlage der regelungsbasierten Modelle und der Modellierung des Materialflusses. Die methodische Grundlage zur Prognose des Produktionssystemverhaltens ist die Betrachtung der Stabilität der regelungstechnischen Modelle und deren charakteristische Gleichungen. Basierend auf dieser Eigenschaft eines Regelkreises kann auf logistische Zielgrößen eines Produktionssystems geschlossen werden (Gleißner und Meier 2001; Petermann 1996) (vgl. Abschnitt 3.2.4). Ausgehend von diesem Zusammenhang wird in den folgenden Abschnitten eine Klassifizierung des Begriffs Stabilität vorgenommen. In einem zweiten Schritt wird der Parameter definiert, anhand dessen die Prognose über die Stabilitätsanalyse durchgeführt wird. Anschließend stellt dieses Kapitel eine Methode zur Erstellung einer Prognose vor.

8.2 Klassifizierung von Stabilitätskriterien

8.2.1 Definition der Stabilität

Die Stabilität von Systemen, wie Maschinen, Anlagen oder einer Fertigung, ist eine Grundvoraussetzung für technische Prozesse. Mithilfe der Stabilität können Prognosen über das zukünftige Verhalten eines Systems getroffen werden (Klug 2017). Ohne Stabilität wäre eine Wiederholbarkeit von Vorgängen innerhalb eines technischen Systems, wie in einem Arbeitssystem oder in kompletten Produktionssystemen, nicht möglich (Meissner 2009). Aufgrund der hohen Bedeutung dieses Begriffs für diese Arbeit folgt eine Definition. Dabei erfolgt die Diskussion der Definition aus Sicht der Mathematik und der Regelungstechnik.

Im mathematischen Kontext sind Aussagen zur Stabilität den Problemstellungen der qualitativen Theorie von Differentialgleichungen zuzuordnen. Der in der Mathematik relevanteste Stabilitätsbegriff ist die *Lyapunov-Stabilität* (Grüne 2008). Vereinfacht lässt sie sich folgendermaßen formulieren: Eine Lösung einer Differentialgleichung, beschrieben durch eine Trajektorie x , ist stabil, wenn jede andere Lösung, die in der Nähe von x beginnt, für alle Zeiten in der Nähe von x bleibt (Unbehauen 2008). Weicht eine Lösung davon ab, ist die Lösung von x instabil. Abbildung 46 veranschaulicht diese Formulierung.

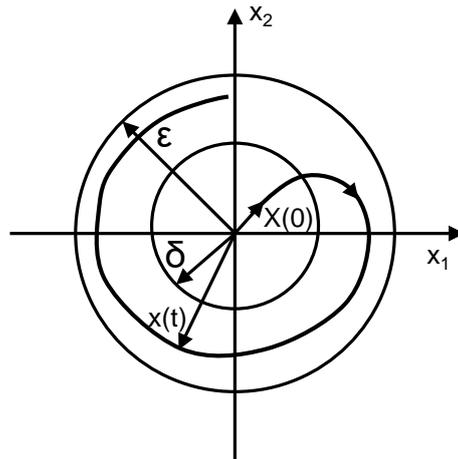


Abbildung 46: Grafische Definition der Stabilität, angelehnt an Unbehauen 2008

Im Folgenden werden die Lyapunov-Stabilität und die asymptotische Stabilität formal mit vier Aussagen definiert.

Definition: Es sei x^* ein Gleichgewicht einer gewöhnlichen Differenzialgleichung gegeben.

1) Das Gleichgewicht x^* wird stabil genannt, falls für jedes $\epsilon > 0$ ein $\delta > 0$ existiert, so dass die Ungleichung

$$\|x(t; x_0) - x^*\| \leq \epsilon \text{ für alle } t \geq 0 \quad (18)$$

für Anfangswerte $x_0 \in \mathbb{R}^n$ mit $\|x_0 - x^*\| \leq \delta$ erfüllt ist (vgl. Formel (18)).

2) Das Gleichgewicht x^* heißt lokal asymptotisch stabil, falls es stabil ist und darüber hinaus eine Umgebung U von x_0 existiert, so dass die Lösung mit Anfangswerten $x_0 \in U$ im folgenden Sinn gleichmäßig gegen x^* konvergiert. Für jedes $\delta > 0$ und $\epsilon > 0$ gibt es ein $T_D > 0$, so dass die Ungleichung

$$\|x(t; x_0) - x^*\| \leq \epsilon \text{ für alle } t \geq T_D \quad (19)$$

für Anfangswerte $x_0 \in U$ mit $\|x_0 - x^*\| \leq \delta$ erfüllt ist (vgl. Formel (19)).

3) Das Gleichgewicht x^* heißt global asymptotisch stabil, falls die Bedingung 2 mit $U = \mathbb{R}^n$ erfüllt ist.

4) Das Gleichgewicht x^* heißt lokal bzw. global exponentiell stabil, falls Konstanten $c, \sigma^o > 0$ existieren, so dass die Ungleichung

$$\|x(t; x_0) - x^*\| \leq ce^{-\sigma t} \|x_0 - x^*\| \text{ für alle } t \geq 0 \quad (20)$$

für alle x_0 aus der Umgebung U von x^* mit $U = \mathbb{R}^n$ im globalen Fall erfüllt ist (vgl. Formel (20)).

Eine weitere Detaillierung kann den folgenden Quellen Grüne und Junge (2016), Aulbach (2010), Grüne (2008) und Walter (2000) entnommen werden.

Allgemein gesprochen bedeutet dies, dass die Lösungen einer gewöhnlichen Differenzialgleichung genau dann Lyapunov-stabil sind, wenn alle Lösungen zu einer gestörten Anfangsbedingung eines Systems für alle Zeiten nahe an der Lösung des Originalproblems bleiben. Konvergiert die Differenz zwischen der Lösung des Originalproblems und des gestörten Systems sogar für $t \rightarrow \infty$ gegen Null, so wird von einer asymptotischen Stabilität gesprochen (Grüne und Junge 2016).

Über die Lyapunov-Stabilität hinaus soll an dieser Stelle ein weiterer Stabilitätsbegriff für allgemeine nichtlineare Systeme definiert werden. In der englischsprachigen Literatur wird diese als Input-to-State-stability (ISS) bezeichnet (Grüne 2008; Sontag 1998).

Definition: Ein System der Form (21) ist Input-to-State stabil, wenn es für jeden Anfangswert \hat{x} und für jeden beschränkten Eingang v ein $\gamma \in K$ und ein $\beta \in KL$ gibt, so dass gilt:

$$\|x(t)\| \leq \beta (\|\hat{x}(t)\|, t) + \gamma (\|v\|_{[0,t]}), t \geq 0 \quad (21)$$

Die Funktion γ fungiert als Verstärkung bzw. Zuwachs.

In der Literatur weichen die Definitionen der ISS teilweise dahingehend voneinander ab, dass für den Zuwachs $\gamma \in K$ stattdessen die stärkere Bedingung $\gamma \in K_\infty$ gefordert wird. Damit gilt insbesondere die Nullabbildung nicht als Zuwachs. Die Abbildung des Zuwachses umfasst die Nullabbildung innerhalb dieser Arbeit.

Die Definitionen aus der Regelungstechnik zur Stabilität und deren Methoden sind aus der Differenzialgleichungstheorie entstanden. Diese Methoden wurden entsprechend an die Problemsituation angepasst und vereinfacht. Die grafische Darstellung in Abbildung 47 führt zur folgenden Definition: „Ein System ist stabil, wenn es in seiner Ruhelage bleibt, solange es nicht von außen angeregt wird, und das in seine Ruhelage zurückkehrt, wenn alle äußeren Anregungen weggenommen werden“ (Lutz und Wendt 2005).

8 Zielgrößenorientierte Prognoseverfahren

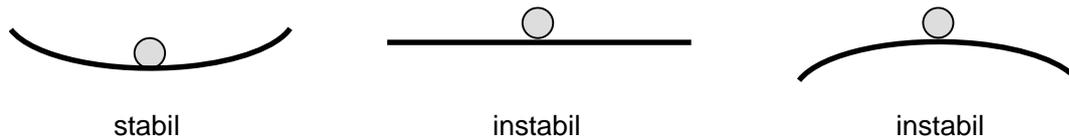


Abbildung 47: Grafische Darstellung verschiedener Ruhelagen von mechanischen Systemen

An dieser Stelle wird die grafische Erläuterung zur Stabilität von Systemen (vgl. Abbildung 47) durch ausgewählte Methoden der Bestimmung der Stabilität aus der Regelungstechnik vertieft. Für weitere Detailinformationen wird auf (Lunze 2014; Unbehauen 2007; Lutz und Wendt 2005) verwiesen.

Die Stabilität von Systemen in der Regelungstechnik lässt sich z. B. anhand der Nullstellen der charakteristischen Gleichung bestimmen. Die charakteristischen Gleichungen sind dabei ein Hilfsmittel für die Berechnung von Koeffizienten. Für die Stabilitätsanalyse ist nur von Interesse, ob alle Nullstellen der charakteristischen Gleichung oder der Übertragungsfunktion einen negativen Realteil (Re) besitzen, siehe Formel (22) (Lutz und Wendt 2005).

$$\begin{aligned} \operatorname{Re} \{ \alpha_i \} < 0, \text{ für alle } \alpha_i (i = 1, \dots, n); (\text{Differenzialgleichungen}) \\ \operatorname{Re} \{ s_i \} < 0, \text{ für alle } s_i (i = 1, \dots, n); (\text{Übertragungsfunktionen}) \end{aligned} \quad (22)$$

Diese Anforderung ist die Grundlage der folgenden Methoden, die in algebraische sowie geometrische Kriterien unterschieden werden.

Bei algebraischen Kriterien wird die Stabilität mittels Koeffizienten (a_n) der charakteristischen Gleichung (vgl. Formel (23)) ermittelt. Hierfür können die Methoden von Routh und Hurwitz genannt werden (Unbehauen 2008). Bei diesen Methoden wird kein exakter Wert der Nullstellen, sondern lediglich eine qualitative Bestimmung zur Stabilität berechnet.

$$a_n * s^n + a_{n-1} * s^{n-1} + \dots + a_1 * s^1 + a_0 = 0 \quad (23)$$

Ein geometrisches Verfahren bestimmt die Stabilität über den Verlauf in einer Ortskurve. Beim Nyquist-Kriterium, welches ein solches Verfahren darstellt, ist für die Stabilität entscheidend, dass der kritische Punkt $(-1, 0)$ beim Durchlaufen der Ortskurve mit ansteigender Kreisfrequenz ω im Bereich links von der Ortskurve liegt. Diese Definition zeigt, dass nur der Realanteil (Re) für die Aussage

zur Stabilität benötigt wird. Die Ortskurve muss bei der Erstellung bis in den Ursprung der Ortskurve gezeichnet werden. In diesem Punkt ist der Imaginäranteil (Im) Null (vgl. Formel (24)).

$$\begin{aligned} \text{Re}\{F_{RS}(j\omega_{krit})\} &= -1 \\ \text{Im}\{F_{RS}(j\omega_{krit})\} &= 0 \end{aligned} \tag{24}$$

8.2.2 Auswahl der Methode zur Stabilitätsanalyse

Das Maß der Stabilität kann, wie beschrieben, mittels algebraischer oder geometrischer Kriterien bzw. in Abhängigkeit der Methode qualitativ bestimmt werden. Die unterschiedlichen Methoden besitzen jeweils eine Voraussetzung für die Anwendungen des Systems hinsichtlich Totzeiten, Linearität und Nichtlinearität. In der vorliegenden Arbeit wird nicht detailliert auf die mathematischen Definitionen und die Gültigkeitsbereiche der unterschiedlichen Arten der Stabilitätstheorie eingegangen, da hierfür auf Adamy (2014), Morel et al. (2008), Dashkovskiy et al. (2007), Chen (2004), Stykel (2002a) und Stykel (2002b) verwiesen wird. In diesem Abschnitt werden die Modellkategorien (vgl. Abschnitt 7.2) und deren Anforderungen und Eigenschaften mit den möglichen Theorien verglichen. Die Reihenfolge der vorgestellten Stabilitätstheorien in der Tabelle 13 ist an die mathematische Allgemeingültigkeit des Stabilitätsnachweises angelehnt (Zabczyk 2008).

Über die aufgeführten Eigenschaften hinaus zeigt eine detaillierte Evaluierung der Stabilitätskriterien weitere Bedingungen, die ihre Anwendbarkeit in einer Produktionsregelung beeinflussen. Vertiefende Informationen und Definitionen der Stabilitätskriterien der folgenden Methoden finden sich in den o.g. genannten Quellen.

8 Zielgrößenorientierte Prognoseverfahren

Tabelle 13: Auswahlmatrix eines Stabilitätskriteriums für die Prognose (X = Bedingung erfüllt, -- = Bedingung nicht erfüllt)

Auswahlmatrix für eines Stabilitätskriteriums für Prognose						
Stabilitätstheorie	Eigenschaften					
	Totzeit	Lineare Systeme	Nichtlineare Systeme	Qualitativ / Quantitativ	Algebraisch	Geometrisch
Lyapunov-Stabilität	X	X	X	Qualitativ	X	--
Input-to-State-Stabilität (ISS)	X	X	X	Qualitativ	X	--
Routh-Verfahren	--	X	--	Qualitativ	X	--
Hurwitz-Kriterium	--	X	--	Qualitativ	X	--
Nyquist-Kriterium	X	X	--	Qualitativ	--	X
Wurzelortkurven	--	X	--	Quantitativ	X	X

Eine grundsätzliche Anforderung einer Produktionsregelung und der Prognoseeinheit an die Stabilitätsanalyse ist die algebraische Lösbarkeit. Ausgehend von dieser Anforderung können die drei Methoden *Nyquist-Kriterium*, *Bode-Diagramm* und *Wurzelortkurven* ausgeschlossen werden. Im Weiteren werden die verbliebenen Methoden weiter betrachtet.

Die direkte *Lyapunov-Methode* ist die bedeutendste und zugleich die stärkste Methode für die Stabilitätsanalyse von dynamischen Systemen sowie deren Verhalten in der Ruhelage (Grüne 2008). Ein Vorteil dieser Methode besteht erstens darin, dass bei ihrer Anwendung kein systematischer Fehler auftritt. Zweitens ist es nicht erforderlich, die zugrunde liegenden Differentialgleichungen zu lösen, was einen weiteren Vorteil darstellt (Unbehauen 2008). Stattdessen muss nach einer geeig-

neten Form der Lyapunov-Funktion gesucht werden. Die Herstellung dieser speziellen Form ist in Abhängigkeit von der DGL sehr aufwendig und ist nicht automatisiert durchführbar (Mikut 1999). Da sich die DGL im vorliegenden Ansatz dieser Arbeit mit jedem Produktionsszenario ändert, ist diese Methode nicht geeignet.

Die ISS-Methode wird häufig zur Untersuchung der Stabilität nichtlinearer Regelsysteme mit externen Eingängen verwendet (Sontag und Wang 1996). Dabei werden die Auswirkungen der Eingangsänderungen eines Regelsystems hinsichtlich der Stabilität der Zustände algebraisch berechnet (Sontag 1998). Bei einer linearen zeitinvarianten DGL kann mit der ISS-Methode ebenso auf die Stabilität der Ausgänge geschlossen werden (vgl. Anhang 12.3). Ein weiterer Vorteil dieser Methode ist die Zerlegung von DGL in mehrere Teilsysteme (siehe Abbildung 48).

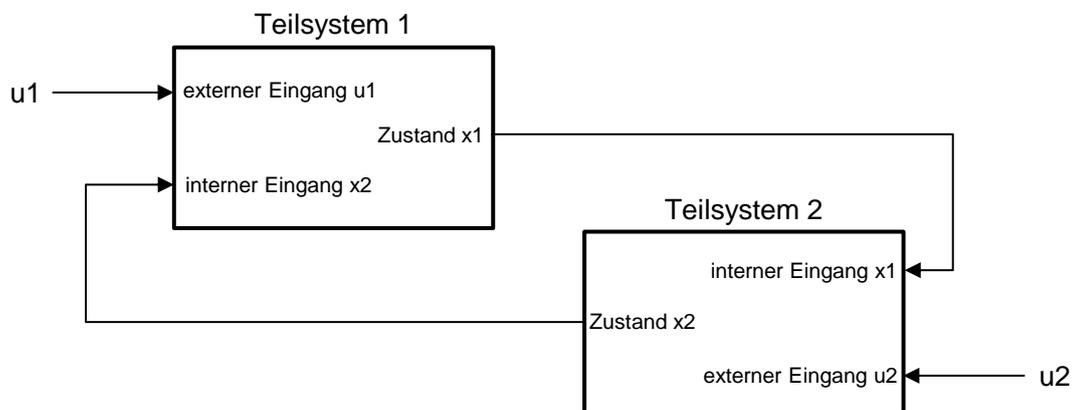


Abbildung 48: Schematische Darstellung einer Kopplung der zwei Systeme, in Anlehnung an Berger et al. (2019) und Sontag und Wang (1996)

Es zeigt sich, dass das Gesamtsystem nicht notwendigerweise das ISS-Kriterium erfüllen muss, wenn die einzelnen Teilsysteme 1 und 2 eine Stabilität aufweisen (Grüne 2008). Hierfür wird eine Zusatzbedingung an die internen Zustände der Teilsysteme benötigt. Die Axiome bzw. Sätze für das Small Gain Theorem (SGT) sind im Anhang 12.3 formuliert (Deaecto et al. 2012; Dashkovskiy et al. 2007).

Mit dem *Hurwitz-Kriterium* lassen sich Systeme hinsichtlich der Stabilität qualitativ bewerten. Das Verfahren ist flexibel und kann so Regelsysteme und einzelne Übertragungsglieder beurteilen. Wie in Tabelle 13 aufgeführt, dürfen die Systeme keine Totzeitelemente enthalten und müssen linear sein (Lutz und Wendt 2005).

Der detaillierte Abgleich zwischen den Anforderungen und der Gültigkeit der Stabilitätskriterien zeigt, dass sich formal nur die ISS-Methode für eine Aussage zur

Stabilität im Rahmen dieser Arbeit eignet. Durch die Möglichkeit, während der Stabilitätsanalyse mittels der ISS-Methode Teilsysteme zu bilden, kann auch für lineare Teilsysteme ohne Totzeit das Hurwitz-Kriterium genutzt werden. Das Hurwitz-Kriterium eignet sich bei Gleichungen und Übertragungsfunktionen mit höherer Ordnung aufgrund ihres formalistischen Ansatzes. Im folgenden Abschnitt wird eine Verknüpfung zwischen den betrachteten Stabilitätskriterien und den untersuchten logistischen Zielgrößen hergestellt.

8.3 Entwicklung einer Zielgrößenprognose

8.3.1 Allgemeines

Die ausschlaggebende Zielgröße bei produzierenden Unternehmen ist die Termintreue, die mit der Durchlaufzeit (*DLZ*) stark zusammenhängt (Meinholz und Förtsch 2019; Nyhuis et al. 2016). Die *DLZ* setzt sich aus den folgenden Termen zusammen: Lagerzeiten (*ZL*), innerbetriebliche Transportzeiten (*ZTR*), Arbeitszeiten mit den verbundenen Rüstzeiten ($TRA_{m,as}$), mittlerer Bestand ($B_{m,as}$) mittlere Leistung ($L_{m,as}$) an den Arbeitssystemen (Nyhuis und Wiendahl 2009). Die Summe dieser Faktoren bildet die gesamte *DLZ* von der Auftragsfreigabe bis zur Auslieferung (vgl. Formel (25)).

$$DLZ_{ges} = \sum_{a=1}^{n_{AS}} \frac{B_{m,a}}{L_{m,a}} + TRA_{m,a} + \sum_{l=1}^{n_{LE}} ZL_l + \sum_{t=1}^{n_{TE}} ZTR_t \quad (25)$$

$$R_m \cong DLZ_{ges} \quad (26)$$

mit	DLZ_{ges}	Gesamte Durchlaufzeit [BKT]
	n_{AS} ,	
	n_{LE} ,	Endwert der jeweiligen Summe [-]
	n_{TE}	
	a, l, t	Laufvariablen der jeweiligen Summe [-]
	$B_{m,as}$	Mittlerer Bestand am Arbeitssystem [Std]
	$L_{m,as}$	Mittlerer Leistung des Arbeitssystems [Std/BKT]
	$TRA_{m,as}$	Rüstzeit des Arbeitssystems [BKT]

ZL_l	Lagerzeit [BKT]
ZTR_t	Transportzeit [BKT]
R_m	Mittlere Reichweite [BKT]

Die Voraussetzung für die Anwendung von Formel (25) ist ein längerer Betrachtungszeitraum, um den Zusammenhang gemäß Formel (26) herstellen und somit die Durchlaufzeit berechnen zu können (Nyhuis und Wiendahl 2012).

Die Lagerzeiten nehmen je nach Fertigung oder Produkt einen hohen Zeitanteil in Anspruch; allerdings ist dieser durch die Produktionsplanung vorgesehen und selten von Störungen betroffen (Meissner 2009). Ebenso haben ungeplante Ereignisse kaum Einfluss auf die Transportzeit im Rahmen der gesamten Produktionsdauer. Der Bearbeitungsprozess an den Arbeitssystemen bietet somit das größte Potenzial zur gezielten Beeinflussung der DLZ. In einer Arbeitszeit ist neben der Rüstzeit die maximal mögliche Leistung eines Arbeitssystems für die Durchführungszeit entscheidend. Diese maximal mögliche Leistung setzt sich aus der verfügbaren Betriebsmittelkapazität (*BKAP*) und der nutzbaren Personalkapazität (*PKAP*) zusammen (Formel (27)).

$$L_{max} = \min\{BKAP_v, PKAP_n\} \quad (27)$$

mit	L_{max}	Maximale Leistung [Std/BKT]
	$BKAP_v$	Betriebsmittelkapazität [Std/BKT]
	$PKAP_n$	Personalkapazität [Std/BKT]

Der Parameter Betriebsmittelkapazität ist neben den organisatorischen Rahmenbedingungen, wie einem ausreichenden Bestand in einem Arbeitssystem, maßgeblich von der LKL abhängig (vgl. Abschnitt 7.3.2.3). Der Bestand an einer Arbeitsstation ist im Gegensatz zur Arbeitsleistung durch die Planung beeinflussbar und weniger von ungeplanten Ereignissen betroffen (Meissner 2009). So ergibt sich das größte Potenzial für die Prognosebildung hinsichtlich der Leistungskennlinien (LKL) von Arbeitssystemen (Berger et al. 2018b; Wiendahl 2012; Kennemann et al. 2011). Der Parameter LKL ist somit ausschlaggebend für die DLZ und kann durch Störungen negativ beeinflusst werden. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt erläutert, ob die Betrachtung der LKL zur Prognose als Stabilitätsanalyse geeignet ist.

8.3.2 Analyse der Zielgrößen

In Abschnitt 7.3.2.3 wurde die LKL eines Arbeitssystems hergeleitet und vorgestellt. Die Leistungskennlinien müssen für die Betrachtung der Stabilität die folgenden drei Anforderungen erfüllen da dies eine notwendige Voraussetzung für die Nutzung der LKL zur Prognose ist:

1. Der Regelkreis ist stabil, wenn das Ausgangssignal bei beschränktem Eingangssignal nicht über alle Grenzen anwächst.
2. Der Regelkreis antwortet auf einen nichtnegativen Eingangsparameter mit einem nichtnegativen Ausgangswert. Dies stellt sicher, keine widersprüchlichen Simulationsergebnisse zu generieren, da die Eingangsparameter per Definition nicht negativ sind.
3. Die Sprungantwort der LKL muss die Anforderungen gemäß Formel (28) nicht nur erfüllen, sondern auch gewährleisten, dass bei einem theoretisch unendlichen Bestand das Arbeitssystem maximal ausgelastet ist.

$$\log_{t \rightarrow \infty} y(t) = 1 \quad (28)$$

Diese Anforderungen gelten sowohl für Arbeitssysteme mit LKL in Form eines PT1- als auch eines PT2-Glieds. In dieser Arbeit werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Anforderungen für beide Formen vorgestellt. Auf einen vollständigen mathematischen Beweis wird an dieser Stelle verzichtet.

Anforderung 1

Um die Erfüllung der Anforderung 1 nachzuweisen, ist es sinnvoll, im ersten Schritt die Führungsübertragungsfunktion aufzustellen und die Polstellen des Nenners für ein PT1-Glied zu betrachten (Formeln (29) und (30)). Dies zeigt, dass die Ausgangswerte unter der Bedingung, dass die proportionale Verstärkung $K_p > 0$ beträgt, stabil bleiben. Dieses Vorgehen kann auf proportionale-Glieder höherer Ordnung übertragen werden (Lutz und Wendt 2005).

$$G_w(s) = \frac{z_o(s)}{z_o(s) + n_o(s)} = \frac{K_p}{s + 1 + K_p} \quad (29)$$

$$s = -1(1 + K_p) \quad (30)$$

Die Stabilität eines Regelkreises mit einem PT2-Glied lässt sich unabhängig von dem eingesetzten Regler in einem zweiten Schritt mit dem *Hurwitz-Kriterium*

8 Zielgrößenorientierte Prognoseverfahren

Aus der Hurwitz-Matrix lassen sich folgende vier Determinanten (Δ_{1-4}) aufstellen:

$$\begin{aligned}\Delta_1 &= K_I + (1 + K_p)N > 0, \\ \Delta_2 &= (K_I + (1 + K_p)N)(1 + 2DN + K_p + K_D N) - \\ &\quad 1 + 2DN + K_p + K_p N \\ \Delta_3 &= \Delta_4 = (2D + N)(K_I + (1 + K_p)N)(1 + 2DN + K_p + K_D N) - \\ &\quad (K_I + (1 + K_p)N)^2 - K_p N(2D + N)^2\end{aligned}\tag{33}$$

Mittels einer geeigneten Wahl der Parameter K_p, K_I, K_D, N und D ergibt sich eine Stabilität.

Anforderung 2

Abgeleitet aus der Zustandsgleichung des Regelkreises lässt sich die zweite Anforderung mit einer allgemeinen Lösung im Zeitbereich (Formel (34)) nachweisen.

$$y(t) = C \int_0^t e^{A(t-\tau)} B u(\tau) d\tau\tag{34}$$

Da die Terme B sowie C und $u(\tau)$ nichtnegative Einträge besitzen, gilt $y(t) \geq 0$. Diese Aussage lässt sich treffen, da in einem realen Arbeitssystem keine negativen Eingänge, z. B. in Form eines Bestandes, vorhanden sind. Negative Bestände lassen sich lediglich in einem virtuellen Planungssystem anführen.

Anforderung 3

In der dritten Anforderung soll das Verhalten eines Arbeitssystems bei einem theoretisch unendlichen Bestand überprüft werden. Dieses Verhalten lässt sich in der Regelungstechnik mit einer sogenannten Sprungantwort (Formel (35)) rechnerisch und grafisch überprüfen.

$$H(s) = G(s) * \sigma_f(s)\tag{35}$$

mit	$H(s)$	Sprungantwort [-]
	$G(s)$	Übertragungsfunktion [-]
	$\sigma_f(s)$	Sprungfunktion [-]

Als Anregung dient die folgende Sprungfunktion:

$$\sigma_f(s) = \mathcal{L}(\sigma_f(t)) = \frac{1}{s} ; \sigma_f(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases} \quad (36)$$

Abbildung 49 zeigt das Verhalten der beiden Funktionen bei einer Anregung durch die Sprungfunktion. Das Verhalten der PT2-Glieder ist stark abhängig von D , wie in Abschnitt 7.3.2.3 beschrieben. Angewandt auf ein Arbeitssystem stabilisiert sich die Produktionsleistung auf ihrem Maximum über die Zeitspanne hinweg.

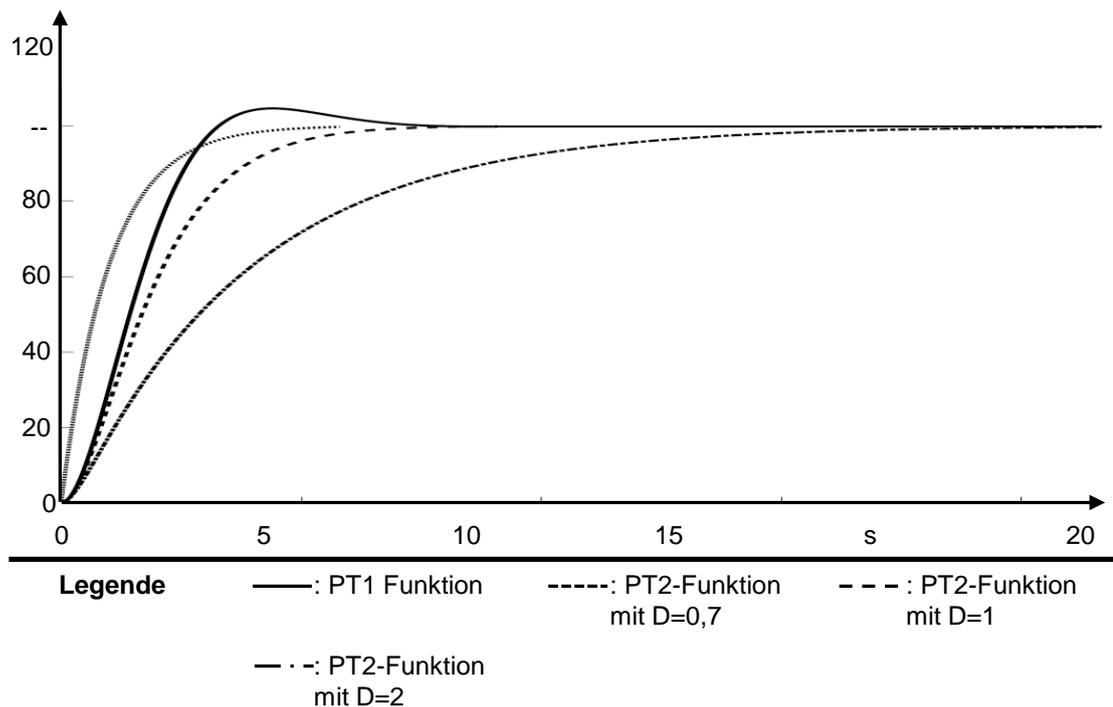


Abbildung 49: Verhalten der PT-1 und PT-2-Funktionen bei einer Sprunganregung

In Abhängigkeit von D zeigen alle Funktionen einen stationären Endwert in Höhe der Verstärkung der Funktion. Dieser Endwert stellt somit die maximale Produktionskapazität eines Arbeitssystems dar und die Anforderung 3 ist entsprechend erfüllt.

Es lässt sich zusammenfassen, dass beide Funktionen die drei Anforderungen erfüllen und in dieser Arbeit angewendet werden können.

Aus dieser Erkenntnis heraus kann abgeleitet werden, dass die Prognose auf Basis der Stabilitätsbetrachtung der Leistungskennlinien der Arbeitssysteme ausreicht, um Aussagen über die Durchlaufzeit zu treffen (Berger et al. 2019; Berger et al. 2018a).

8.3.3 Beschreibung der Methode für die Zielgröße

Die Integration in die Produktionsregelung erfolgt methodisch auf Basis des ausgewählten Analyseverfahrens für die Stabilität des Gesamtsystems (Abschnitt 7.3). Dabei werden die Produktionselemente durch regelungstechnische Modelle abgebildet und die Stabilität wird mittels des Hurwitz-Kriteriums nachgewiesen (Abschnitt 8.2).

In Abbildung 50 ist die Methode in Form eines Flussdiagramms dargestellt. Die Arbeitsschritte aus dem Ablauf sind im Weiteren detailliert.

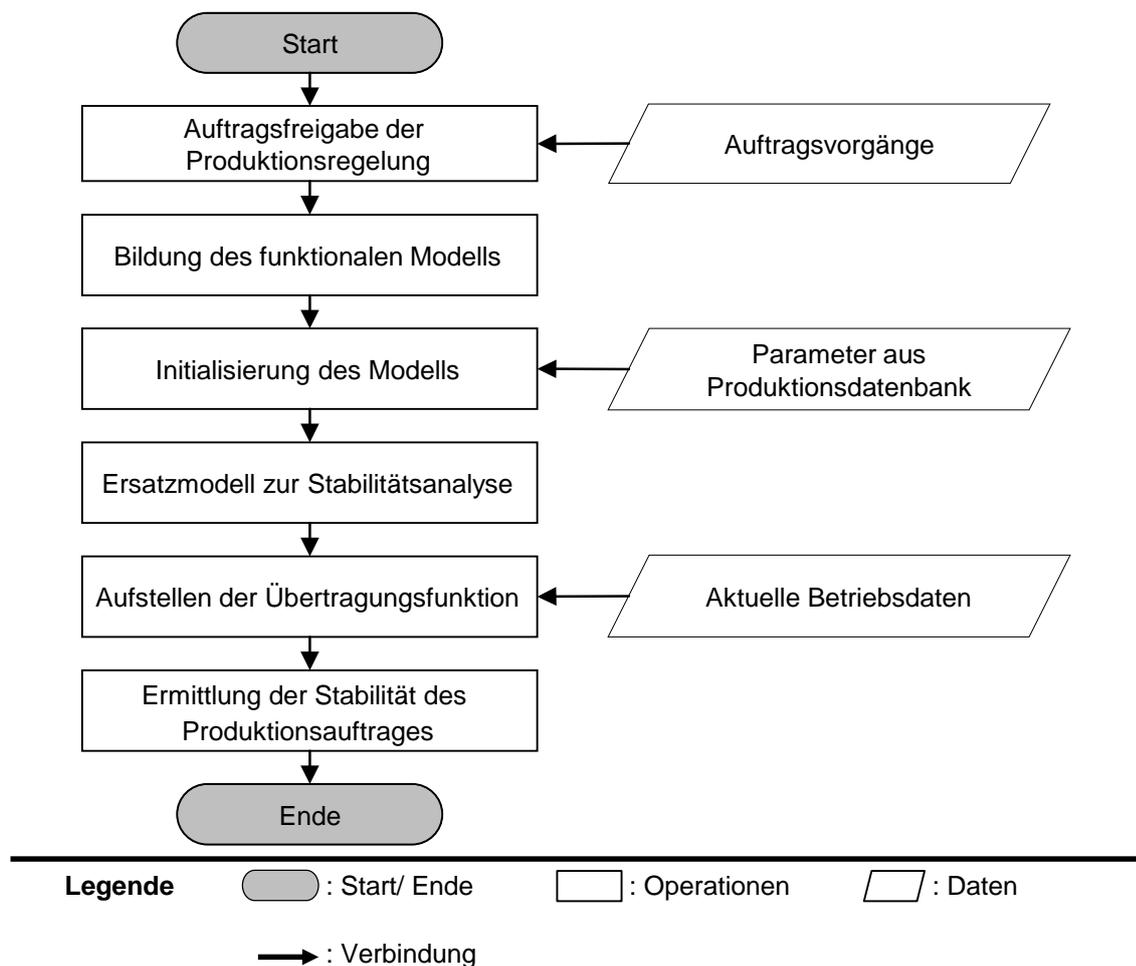


Abbildung 50: Flussdiagramm der Prognosemethode auf Basis einer Stabilitätsanalyse

Im ersten Schritt der Methode erfolgt die Auftragsfreigabe von der Produktionsplanung an die Produktionsregelung. Mit der Freigabe des Auftrags werden Informationen über die geplanten AVO an die entsprechenden Arbeitssysteme, Lager- und Transporteinheiten übergeben. Im zweiten Schritt erfolgt die Bildung eines

funktionellen Modells des freigegebenen Auftrags. Mit dem funktionalen Modell wird der vollständige Materialfluss mit den benötigten Fertigungsressourcen des Auftrags abgebildet. Grundlage für diese Modellierung sind die Modelle aus dem Abschnitt 7.3. Nach der Generierung des Modells werden in einem dritten Schritt die benötigten Parameter und Daten, wie z. B. die LKL, D sowie der initiale Bestand, eingesetzt. Informationsquellen dafür sind die Produktionsdatenbank und die Public Cloud Services (Abschnitt 5.2.2). Mit diesem Modell kann der Produktionsverlauf unter Berücksichtigung der aktuellen Ereignisse, des Verschleißes an Arbeitssystemen und der nötigen Wartungen simuliert werden (Berger et al. 2018a). Der vierte Schritt der Methode erzeugt aus dem parametrisierten funktionellen Modell ein vereinfachtes Ersatzmodell zur Stabilitätsanalyse. Grund für diesen Schritt sind die Multiplikationen und Divisionen von Signalen durch die Funktionsblöcke (vgl. Abbildung 39). Diese Operationen und Funktionsblöcke sind nichtlinear und erhöhen den Aufwand bei der Stabilitätsanalyse. Auf Grundlage des Ersatzmodells folgt im fünften Schritt die Bildung des mathematischen Modells in Form einer Übertragungsfunktion, die mittels einer Laplace-Transformation in eine DGL umgeformt wird. Mit der transformierten Übertragungsfunktion in Form einer nichtlinearen DGL erfolgt die qualitative Ermittlung der Stabilität des spezifischen Regelmodells.

8.4 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde ein geeignetes Prognoseverfahren ausgewählt und hinsichtlich der Anforderungen der Produktionsregelung untersucht. Das vierte Systemelement baut auf der Modellierung der Fertigungsressourcen auf und ermöglicht die Beurteilung des geplanten Produktionsverlaufes bezüglich der geplanten Durchlaufzeit. Dadurch trägt dieser Baustein zur Bewertung des Produktionsverlaufes bei.

Zunächst erfolgte die allgemeine Definition der Stabilität im Kontext der Produktion. Dieser schloss sich die Einführung der Berechnungsmethode an. In einem weiteren Schritt wurden geeignete Vorgehen zur Stabilitätsanalyse auf ihre Eigenschaften untersucht und diskutiert. Als Ergebnis zeigte sich, dass sich eine Kombination der Methoden ISS und dem *Hurwitz-Kriterium* als geeignete Stabilitätsanalysen für die vorliegende Arbeit anbieten. Anschließend wurden die Anforderungen weiter detailliert und die Hurwitz-Methode beispielhaft evaluiert.

8 Zielgrößenorientierte Prognoseverfahren

Durch die Erstellung einer Methode zum Einsatz des ausgewählten Prognoseverfahrens lässt sich die Stabilitätsanalyse in die Produktionsregelung integrieren.

9 Technische Umsetzung und Validierung

9.1 Übersicht

Die folgenden Abschnitte zeigen die Umsetzbarkeit des Systems zur Produktionsregelung für CPPS. Dieses Kapitel dient dazu, den Nutzen und die technische Umsetzung zu validieren sowie die Wirtschaftlichkeit nachzuweisen. Der Abschnitt 9.2 beschreibt das Anwendungsbeispiel für die technische Umsetzung der entwickelten Produktionsregelung. Basierend auf dem Anwendungsbeispiel folgen die Umsetzung der Modellierung sowie die Stabilitätsanalyse. Zuletzt wird die technische Bewertung auf Grundlage der Anforderungen aus dem Abschnitt 3.4 und eine wirtschaftliche Abschätzung des Systems durchgeführt.

9.2 Technische Umsetzung

9.2.1 Allgemeines

Die Umsetzung und Validierung des Systems zur Produktionsregelung von CPPS erfolgt anhand einer Brillenglasfertigung. Die Produktion von Brillengläsern wird mit den folgenden vier grundlegenden Wertschöpfungsprozessen durchgeführt: Herstellung des Halbfabrikats, Brillenglasfertigung, Randbearbeitung und Montage. Der Ablauf ist in Abbildung 51 aufgezeigt. Im ersten Schritt wird aus Quarzsand oder Kunststoff ein Halbfabrikat (Brillenglasrohling) mit optisch wirksamer Oberfläche produziert. Aus diesen Brillenglasrohlingen werden im zweiten Schritt, basierend auf dem Kundenauftrag, über mehrere Arbeitsgänge, wie Blocken, Generieren und Polieren, Brillengläser mit individueller Sehstärke produziert. Diese gehen durch eine Kontrolle, der sich der Versand an den Optiker anschließt. In den weiteren Bearbeitungsschritten, die durch den Optiker dezentral durchgeführt werden, erfolgt die Randbearbeitung der Brillengläser, wobei das Brillenglas die endgültige Form erlangt. Den Abschluss bildet die Montage in die Brillenfassung.

Die maßgebliche logistische Zielgröße bei der Herstellung von Brillengläsern ist eine kurze Durchlaufzeit, da die Lieferzeit max. 24 - 36 Stunden betragen darf. Die Erreichung der Zielgrößen wird neben der Produktionskomplexität und dem engen Zeitfenster außerdem durch die hohe Individualität des Produkts und dem hohen Kostendruck erschwert (Berlak 2019).

9 Technische Umsetzung und Validierung

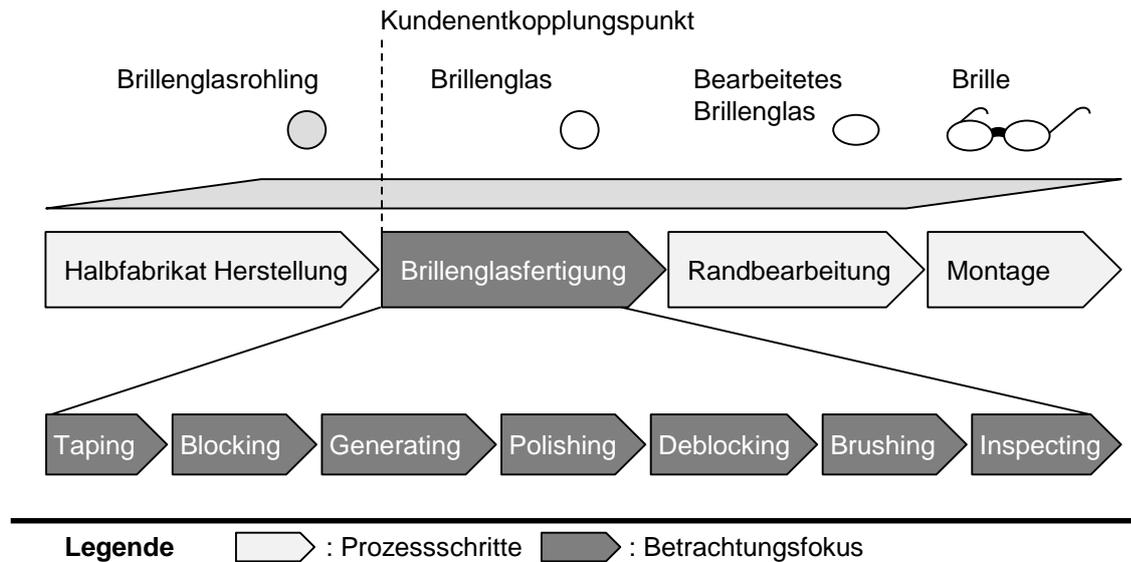


Abbildung 51: Übersicht der einzelnen Produktionsprozesse einer Brillenglasfertigung

In der betrachteten Brillenglasfertigung werden durchschnittlich 5.000 Gläser pro Tag hergestellt. Dies entspricht ca. 2.500 Kundenaufträgen, die in drei Schichten auf 28 Maschinen und an 10 Handarbeitsplätzen bearbeitet werden. Die Durchlaufzeiten je Fertigungsschritt variieren zwischen 30 Sekunden und 28 Minuten. Die einzelnen Bearbeitungszeiten an den Maschinen hängen von der individuellen Brillenglasvariante ab.

Bei der hohen Anzahl an täglichen Arbeitsschritten - bis zu 75.000 Stück - kommt der Auftragsüberwachung eine große Bedeutung zu. Durch die hohe Anzahl der Arbeitsschritte wirken sich Verzögerungen bei der Bearbeitung, beim Warten und Rüsten auf viele Aufträge aus. Daher müssen die Auswirkungen einer Verzögerung auf den Fertigungsablauf frühzeitig erkannt werden, damit sich die Liefertermine der zukünftigen Kundenaufträge präziser bestimmen lassen.

9.2.2 Beschreibung des Fertigungssystems

Zur Steigerung des Verständnisses erfolgt zunächst eine Beschreibung des Fertigungsprozesses von Brillengläsern für den Betrachtungsraum der vorliegenden Arbeit (vgl. Abbildung 52).

Die Brillenglasrohlinge (Blanks) werden aus dem Lager entnommen und in Werkstückträger einsortiert. In der Regel besteht ein Kundenauftrag aus zwei Gläsern. Der Werkstückträger wird mittels eines Förderbandsystems zu den jeweiligen Bearbeitungsstationen transportiert, an denen die verschiedenen Fertigungsschritte

durchgeführt werden. Als Puffer dienen die Förderbandabschnitte, auf denen ein Werkstückträger im Umlauf gehalten werden kann.

Der Fertigungsprozess startet mit dem Aufbringen eines Schutzfilms auf eine Seite des Brillenglasrohlings. Dieses sogenannte **Taping** ist der erste Schritt, wobei Saugnäpfe vollautomatisiert die Brillenglasrohlinge aus dem Werkstückträger entnehmen und die Schutzfolie (Tape) auftragen. Im zweiten Schritt, dem **Blocking**, wird auf dem unbearbeiteten Linsenkörper eine Haltevorrichtung (Blockstück) für die weiteren Bearbeitungsmaschinen aufgebracht. Das **Generating** im dritten Schritt beinhaltet im Wesentlichen Drehprozesse, die dem Brillenglas seine finale geometrische Form und die optische Wirkung verleihen. Anschließend wird die Linse im Schritt **Polishing** zu einem transparenten Brillenglas weiterverarbeitet. Im fünften Schritt, dem **Deblocking**, wird das Blockstück entfernt und das Brillenglas anschließend einem Reinigungsprozess (**Brushing**) unterzogen. Hierbei werden Verunreinigungen und Kleberückstände des Blockstückes entfernt. Zuletzt erfolgt im siebten Schritt die finale Kontrolle (**Inspecting**) des Brillenglases hinsichtlich Material- und Oberflächenfehlern sowie geometrischen und optischen Parametern der Linse.

Die beschriebenen Fertigungsschritte sind mittels Förderbänder flexibel verbunden. So kann eine Kapazitätssteigerung durch die Integration weiterer Maschinen für den jeweiligen Prozessschritt erfolgen. Die Steuerung der Förderbänder und Werkstückträger erfolgt durch das übergeordnete Lab-Management-System (LMS). Dieses LMS stellt eine OPC UA- sowie REST-(Representational State Transfer) Kommunikationsschnittstelle zur Förder- und Anlagentechnik zur Verfügung. Darüber hinaus speichert das LMS die Stammdaten sowie die Kundenaufträge und die Bewegungsdaten. Das LMS übernimmt die Aufgaben eines ERP bzw. MES und ist auf die speziellen Gegebenheiten der Brillenglasfertigung angepasst. Zur Umsetzung der Termin- und Kapazitätsplanung kommt ein webbasierter Planungsservice zum Einsatz. Auf der Cloudplattform erfolgt die gesamte Ressourcenplanung mit einer Vorwärtsterminierung und einer Losbildung anhand der Fertigungsschritte.

Der Planungsservice erhält die Stamm- und Bewegungsdaten sowie die Kundenaufträge der kommenden 48 Stunden als Eingabe, vorzugsweise vom Lagerverwaltungssystem (LMS), über eine verschlüsselte VPN-REST-Webservice-Schnittstelle. Über diese Schnittstelle wird das Planungsergebnis des Service, bestehend aus Fertigungsaufträgen, den Arbeitsgängen und Planzeiten an das LMS zur Durchführung übergeben.

9 Technische Umsetzung und Validierung

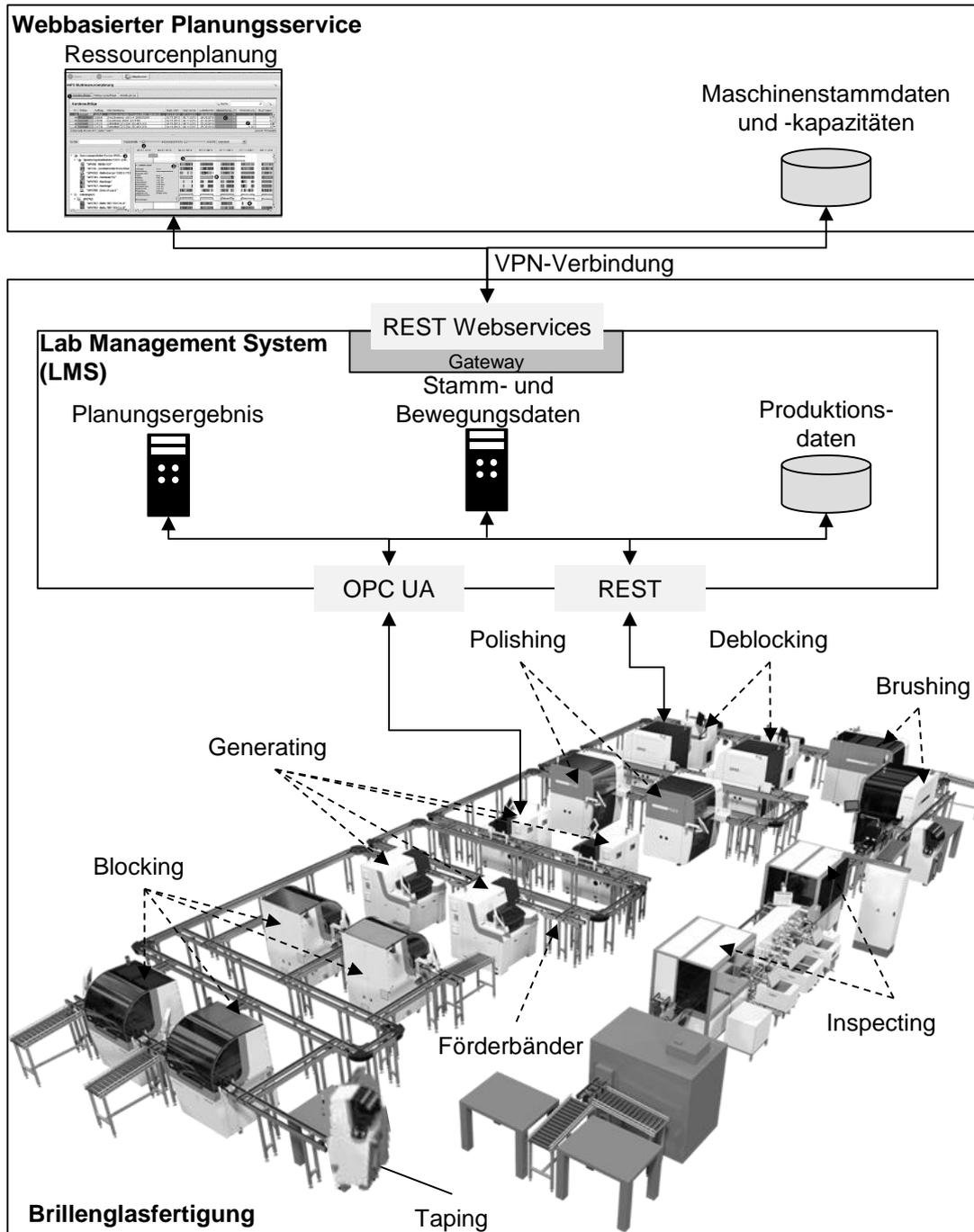


Abbildung 52: Darstellung des betrachteten Fertigungsprozesses

Die Neuplanung der Fertigungsaufträge im Sinne der Produktionssteuerung (vgl. Abschnitt 2.4.5) wird durch Ereignisse, wie Maschinenstörungen oder Abbrüche eines Arbeitsganges, angestoßen und binnen 150 Sekunden abgeschlossen. Befindet sich eine Maschine im Fehlerzustand, werden über die Schnittstelle entsprechende Detailinformationen wie Fehlerbeschreibung, -klassifikation und -gruppe

gesendet. Über diese Schnittstelle werden zusätzlich Informationen zum Wartungsstatus übertragen. Dies erfolgt unabhängig davon, ob aktuell eine Wartung durchgeführt wird oder in der Zukunft geplant ist.

9.3 Anwendung des Systems zur Produktionsregelung

9.3.1 Allgemein

Zur Umsetzung des entwickelten Systems zur Produktionsregelung sind Erweiterungen in der Softwarearchitektur der Brillenglasfertigung und des webbasierten Planungsservice notwendig (vgl. Abbildung 52). Dies betrifft Anpassungen in der Kommunikationsstruktur, die zur Umsetzung der Produktionsregelung temporär vorgenommen werden. Darüber hinaus erfolgt eine Integration der beiden Softwaremodule, der Modelleinheit für den Einsatz der Produktionsmodelle und die Prognoseeinheit zur Durchführung der Stabilitätsanalyse (vgl. Abschnitt 9.3.3) für den spezifischen Anwendungsfall.

9.3.2 IT-Architektur und Regelungsstrukturen

Gemäß der Referenzarchitektur, wie sie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben ist, geschieht die Implementierung der Modelle in der Softwareumgebung des webbasierten Planungsservice. So kann die skalierbare Rechenleistung der Cloudplattform zur Analyse und Durchführung der Simulation genutzt werden.

Die grundlegende Implementierung der Produktionssoftware, wie z. B. des LMS und des Advanced Planning and Scheduling (APS), sowie der Kommunikationsprotokolle erfolgt gemäß der beschriebenen Architektur. Dazu wurden vorübergehend Änderungen und Erweiterungen am Produktionssystem in den folgenden Bereichen vorgenommen:

- Die in der Fertigung verwendete Produktionsdatenbank entspricht nicht der geforderten Aufteilung. Aus diesem Grund werden weitere Datenbankabfragen, wie Selektionen, Vereinigungen und Projektionen im LMS eingerichtet, um die notwendigen Informationen bereitzustellen.
- Die Stammdaten aus dem LMS können durch Datenbankabfragen genutzt werden. Zur Identifizierung der Produktionsentitäten in der Brillenglasfertigung wird das Vorgehensmodell (vgl. Abbildung 23) durchlaufen. Wie

9 Technische Umsetzung und Validierung

beschrieben, werden die Arbeitssysteme sowie die Lager- und Transporteinheiten mit dem Vorgehensmodell bestimmt. Das Ergebnis dieses Vorgehens sind 17 Maschinen (AS1-7), drei Lagereinheiten (LE2-4) sowie sechs Transporteinheiten (TE2-7).

In der folgenden Tabelle 14 sind die Ergebnisse des Vorgehensmodells zusammengefasst. Darüber hinaus sind die Regelmaßnahmen den einzelnen Prozessen zugeordnet.

Tabelle 14: Auflistung der Arbeitssysteme, Lager- und Transporteinheiten der Brillenglasfertigung sowie die jeweiligen Regelmaßnahmen

Prozess ID_Nr.	Prozess	Anzahl Maschinen	Regelmaßnahme
AS1	Taping	1	Überstunden / Zusatzschichten
AS2	Blocking	4	Auftragssplitting Überstunden / Zusatzschichten Höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit
AS3	Generating	4	Auftragssplitting
AS4	Polishing	2	Höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit
AS5	Deblocking	2	Auftragssplitting Höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit
AS6	Brushing	2	Auftragssplitting Höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit
AS7	Inspecting	2	Überstunden / Zusatzschichten
LE2-4	Lager	3	
TE2-7	Transport	6	

Die Umsetzung der Regelungsstrukturen erfolgt ebenfalls mittels der IT-basierten Verknüpfung der Arbeitssysteme mit dem webbasierten Planungsservice.

Die Anforderung der Abtastfrequenz hinsichtlich der Anzahl von Rückmeldungen von den Arbeitssystemen ist direkt im Planungsservice temporär hinterlegt wor-

den. Hierfür wurden die Eckdaten der Hüllkurvenparameter und der Regelungsmaßnahmen je Arbeitssystem im webbasierten Planungsservice hinterlegt. Zudem wurde die Detaillierung des Arbeitsfortschritts der Maschinen durch eine Erweiterung des Kommunikationsprotokolls des LMS um die PE (vgl. Abschnitt 5.2.6) durchgeführt. Die PE werden durch zusätzliche Anfragen der Ressourcenplanung an alle Fertigungssysteme generiert. Die Abtastfrequenz wurde entsprechend den Anforderungen im Planungsservice umgesetzt.

Mit der Umsetzung der genannten Punkte in diesem Abschnitt und der damit verbundenen Anpassung der Informationssysteme erfüllt die betrachtete Produktion die Anforderungen an die Architektur des entwickelten Systems. Dies zeigt die Umsetzbarkeit der entwickelten Referenzarchitektur für die Produktionsregelung.

9.3.3 Modellierung des Fertigungssystems und der Stabilitätskriterien

Die Basis des Simulationsmodells ist die beschriebene Brillenglasfertigung (vgl. Abbildung 52). Nicht beachtet werden Varianten, wie die Einfärbung oder das Auftragen von Schutzschichten auf die Gläser. Wie bereits dargestellt, fokussiert sich die Umsetzung auf die Bearbeitung von Brillenglasrohlingen bis zur abschließenden Kontrolle der fertigen Brillengläser. Dadurch reduziert sich die Anzahl der für die Produktionsregelung betrachteten Maschinen auf 17 und die Handarbeitsplätze entfallen.

Zur Steigerung der Übersichtlichkeit wurden für die weitere Modellierung die Maschinen der jeweiligen Prozessschritte zusammengefasst. Dies ist zulässig, da die einzelnen Maschinen sowohl baugleich sind als auch die identische Produktionsleistung besitzen. So ergeben sich sieben Arbeitssysteme, die im Folgenden entsprechend modelliert und verknüpft werden.

Die vier Bearbeitungsmaschinen des Fertigungsschritts Blocking (AS2) sind im Arbeitssystem *2_Blocking* zusammengefasst. Der Materialfluss wird mit den Funktionsblöcken für die Lager (LE)- und Transporteinheiten (TE) unter der Beachtung der Modellierungsregeln (vgl. Abschnitt 7.4.1) hergestellt. Das Modellierungswerkzeug Multiplexer fasst die Ausgänge der Funktionsblöcke zusammen und ermöglicht eine übersichtliche informationstechnische Verknüpfung der Funktionsblöcke.

Die Parameter für die AS, LE und TE ergeben sich zum einen direkt aus den historischen Daten aus der Datenbank und zum anderen basierend auf der Berechnung der darin enthaltenen Informationen. In Tabelle 15 sind grundlegende Parameter

9 Technische Umsetzung und Validierung

der Arbeitssysteme exemplarisch aufgeführt. Die Methoden zur Berechnung der sechs Parameter werden nachfolgend erläutert.

Tabelle 15: Parameter der sieben Arbeitssysteme des Umsetzungsbeispiels

Parameter der Arbeitssysteme						
Arbeitssystem (AS)	AS _{Kap,max} (Std/BKT)	AS _{Kap,m} (Std/BKT)	R _m (BKT)	MB _{min} (Std)	T (-)	D (-)
1_Taping	100	96	0,060	325	12,1	1
2_Blocking	800	712	0,024	1016	15,9	0,9
3_Generating	400	68	0,029	628	15,6	0,85
4_Polishing	200	190	0,042	458	13,6	0,88
5_Deblocking	400	364	0,029	628	16,5	1
6_Brushing	144	134	0,048	373	15,0	1
7_Inspecting	200	188	0,041	439	14,4	1

Der Parameter AS_{Kap,max} ist die nominale maximale Leistung jedes Arbeitssystems pro Stunde. Davon ausgehend wird die mittlere Leistung jedes Arbeitssystems mit der Formel (37) berechnet und mit der Produktionsdatenbank abgeglichen. Dies ist ein theoretischer Wert, in welchem keine Aufwände zum Rüsten oder zur Wartung einberechnet sind.

$$AS_{Kap,m} = AS_{Kap,max} * (1 - ((1 - \sqrt[4]{t})^4)) \quad (37)$$

mit AS_{Kap,m} mittlere Leistung [-]

AS_{Kap,max} nominale maximale Leistung [-]

Die Variable t wurde individuell für jedes Arbeitssystem im eingeschwungenen Zustand bestimmt. Mit diesem mathematischen Zusammenhang lässt sich die mittlere Leistung AS_{Kap,m} des Arbeitssystems berechnen.

9.3 Anwendung des Systems zur Produktionsregelung

Der dritte Parameter aus Tabelle 15, die mittlere Reichweite R_m , beziffert die Dauer und den Zugang von Aufträgen bis zur vollständigen Abarbeitung des Bestandes bei gleichbleibender Leistung an einem Arbeitssystem. Die Berechnung wird mit der Formel (38) durchgeführt.

$$R_m = \frac{MB_{min}}{AS_{Kap,m}} \quad (38)$$

Die Berechnung des Mindestbestandes MB_{min} an jedem Arbeitssystem erfolgt mit folgender Formel:

$$MB_{min} = ZAU_m (1 + ZAU_v) + ZTR_m \quad (39)$$

Der vierte Parameter aus Tabelle 15 wird mit der Formel 39 berechnet. Die Berechnung geschieht durch die Verwendung des Mittelwertes der Auftragszeit (ZAU_m), des Variationskoeffizienten der Auftragszeit (ZAU_v) und der durchschnittlichen Transportzeit (ZTR_m). Diese Werte können basierend auf den bereits abgeschlossenen Produktionsaufträgen in der Produktionsdatenbank ermittelt werden. Der Mindestbestand darf nicht unterschritten werden, damit ein Arbeitssystem die mittlere Leistung dauerhaft aufrechterhalten kann.

Über die vier beschriebenen logistischen Parameter hinaus bedarf es der Berechnung der spezifischen Kennwerte für die Arbeitssystemmodelle. Wie in Abschnitt 7.3.2.3 erläutert, wurden alle Arbeitssysteme mit Übertragungsfunktion zweiter Ordnung gemäß der Formel (40) modelliert.

$$G(s)_{AS,n} = \frac{AS_{Kap,max,n}}{T_{AS,n}^2 * s^2 + 2 * D_{AS,n} * T_{AS,n} * s + 1} \quad (40)$$

Der Parameter für die Verstärkung einer Übertragungsfunktion K entspricht der maximalen Leistung des Arbeitssystems $AS_{Kap,max}$ und wurde zur Steigerung des Verständnisses entsprechend ersetzt. Die Zeitkonstante T im Divisor wurde mit der beschriebenen Zeitprozentkennwertmethode nach Latzel (1993) durch Formel (12) bestimmt. Die Berechnung der Dämpfung D erfolgt nach dem dargestellten Vorgehen aus Abbildung 42. Die Parameter der LE und TE, wie die mittlere Transportdauer und die Lagerkapazitäten, sind direkt aus der Produktionsdatenbank zu entnehmen.

Die Modellierung im Anwendungsbeispiel erfolgte mit Hilfe der Software MathWorks Matlab und der darin enthaltenen Toolbox Simulink. Die Daten aus

9 Technische Umsetzung und Validierung

der Produktionsdatenbank sowie vom webbasierten Planungsservice werden entsprechend der Anforderungen der Modelle statisch oder dynamisch für jedes Arbeitssystem übergeben.

Nach der Modellierung des Fertigungssystems ist das Hurwitz-Kriterium zur Prognose der Stabilität anwendbar. Mit den einzelnen Übertragungsfunktionen der Arbeitssysteme, Lager- und Transporteinheiten kann eine Gesamtübertragungsfunktion aufgebaut werden, die mittels dem Hurwitz-Kriterium überprüft werden kann (Berger et al. 2019). Die Gesamtübertragungsfunktion $G(s)_{CPPS, Order_ID}$ besteht aus den spezifischen Arbeitssystemen und den Regeleinheiten, die die Maßnahmen (vgl. Tabelle 14) durchführen. Zur auftragsspezifischen Prognose der Stabilität wird für jeden Fertigungsauftrag eine Gesamtübertragungsfunktion automatisch aus den Einzelgleichungen erstellt. In Abbildung 53 ist exemplarisch ein Blockschaltbild mit den Arbeitssystemen und den Regeleinheiten dargestellt.

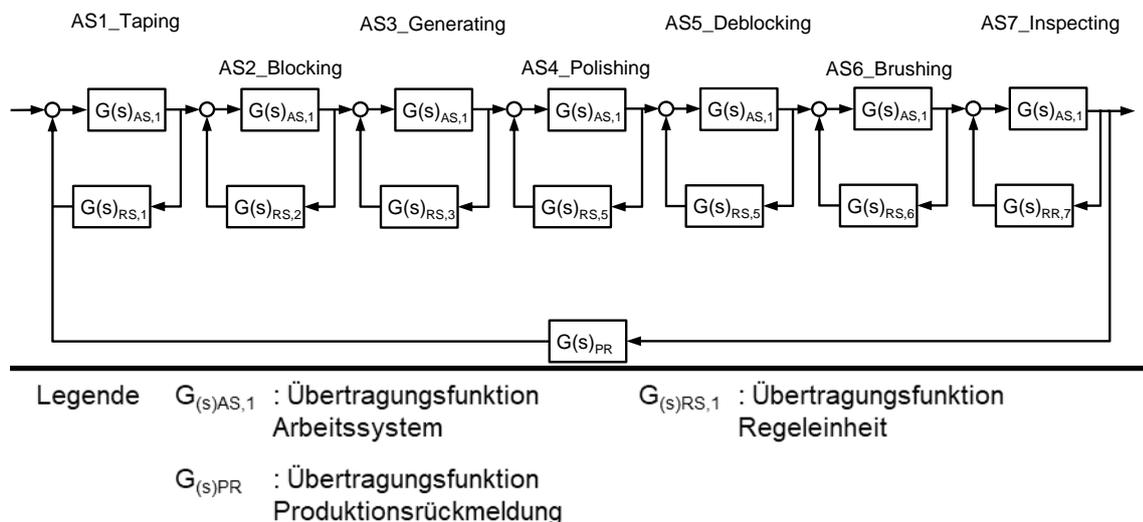


Abbildung 53: Blockschaltbild der benötigten Arbeitssysteme für die Produktion eines Auftrages

Anhand der grafischen Abbildung der Übertragungsfunktionen und der Analyse des Signalfusses lässt sich die Gesamtübertragungsfunktion erstellen. Durch die Blockschaltbild-Algebra ist diese Gleichung in drei Schritten aufstellbar.

Im ersten Schritt erfolgt eine Zusammenfassung der Arbeitssysteme $G(s)_{AS,n}$ mit ihren Regeleinheiten $G(s)_{RS,n}$. Im Anwendungsbeispiel (vgl. Abbildung 53) sind dies sieben Umformungen. Die mathematische Beschreibung dieses Vorgangs durch Anwendung der Blockschaltbild-Algebra zeigt der folgende Ausdruck:

$$G(s)_{ASR,n} = \frac{G(s)_{AS,n} * G(s)_{RS,n}}{1 - G(s)_{AS,n} * G(s)_{RS,n}} \quad (41)$$

Das Ergebnis dieses Schrittes sind sieben Übertragungsfunktionen $G(s)_{ASR}$ und für jedes Arbeitssystem AS_n gibt es eine Übertragungsfunktion mit der Berücksichtigung der Regeleinheit.

Der zweite Schritt fasst diese sieben Übertragungsfunktionen zu einer übergreifenden Übertragungsfunktion zusammen, wie Formel (42) zeigt.

$$G(s)_{CPPS,n} = \frac{G(s)_{ASR,1} * G(s)_{ASR,2} * \dots * G(s)_{ASR,7}}{1 - G(s)_{ASR,1} * G(s)_{ASR,2} * \dots * G(s)_{ASR,7}} \quad (42)$$

Im dritten Schritt erfolgt die Zusammenfassung zu einer Übertragungsfunktion $G(s)_{CPPS_R}$ mit allen Funktionen für den jeweiligen Auftrag, siehe Formel (43).

$$G(s)_{CPPS_R} = \frac{G(s)_{CPPS_R} * G(s)_{PR}}{1 - G(s)_{CPPS_R} * G(s)_{PR}} \quad (43)$$

Durch die Verwendung der einzelnen Parameter (vgl. Tabelle 15) in den Übertragungsfunktionen lässt sich eine spezifische Übertragungsfunktion für jeden Auftrag ableiten. Diese lassen sich dank des Hurwitz-Kriteriums überprüfen (vgl. Abschnitt 8.3.2).

9.4 Simulationsbegleitende Umsetzung und Validierung

9.4.1 Allgemein

Der prototypische Anwendungsfall, die technischen Randbedingungen und die methodischen Vorarbeiten der Arbeit wurden in Abschnitt 9.2 erläutert. Die Arbeiten, die eine Prognose erlauben, sind hinsichtlich ihrer Aussagekraft zunächst zu validieren. Dies ermöglicht eine Simulation. Durch das entwickelte System generiert die Simulation quantitative Ergebnisse zur Termintreue des Produktionssystems. Die Umsetzung des Anwendungsbeispiels dient somit auch der Validierung der Maßnahmen, die auf Basis der Ergebnisse des Prognoseverfahrens ausgelöst werden. Wie in der VDI-Richtlinie 3633 definiert, ist eine Simulation eine Nachbildung eines realen Systems, um auf Basis der Experimente Erkenntnisse zum dynamischen Verhalten des realen Systems zu erlangen (Gutenschwager et al. 2017; VDI 3633 2000).

9 Technische Umsetzung und Validierung

Anhand des erstellten Simulationsmodells können verschiedene Szenarien simuliert und mit definierten Kennzahlen verglichen werden. Zielsetzung der Simulationsstudie ist es, das Prognoseverfahren hinsichtlich der Eintrittswahrscheinlichkeit zu validieren. Zu diesem Zweck wurde in der Software Siemens Plant Simulation ein Simulationsmodell der beschriebenen Brillenglasfertigung sowie der Eingriffsmöglichkeiten des webbasierten Planungsservice aufgebaut. Die Bildung des geregelten Ersatzmodells und die Berechnung der Stabilität wurden mithilfe der Software Matlab umgesetzt.

9.4.2 Beschreibung der prototypischen Umsetzung

Die Umsetzung erfolgte in einem Simulationsmodell auf Basis der beschriebenen Brillenglasfertigung. Die Simulation erlaubt zudem, in die Modellierung der Fertigungsressourcen einzugreifen und die notwendigen Parameter zu berechnen. Zur Durchführung der Validierung der Arbeiten wurde die bestehende IT-Architektur um die weiteren Softwaremodule PR@Service Produktionserzeugung und PR@Modellgenerierung erweitert (vgl. Abbildung 54).

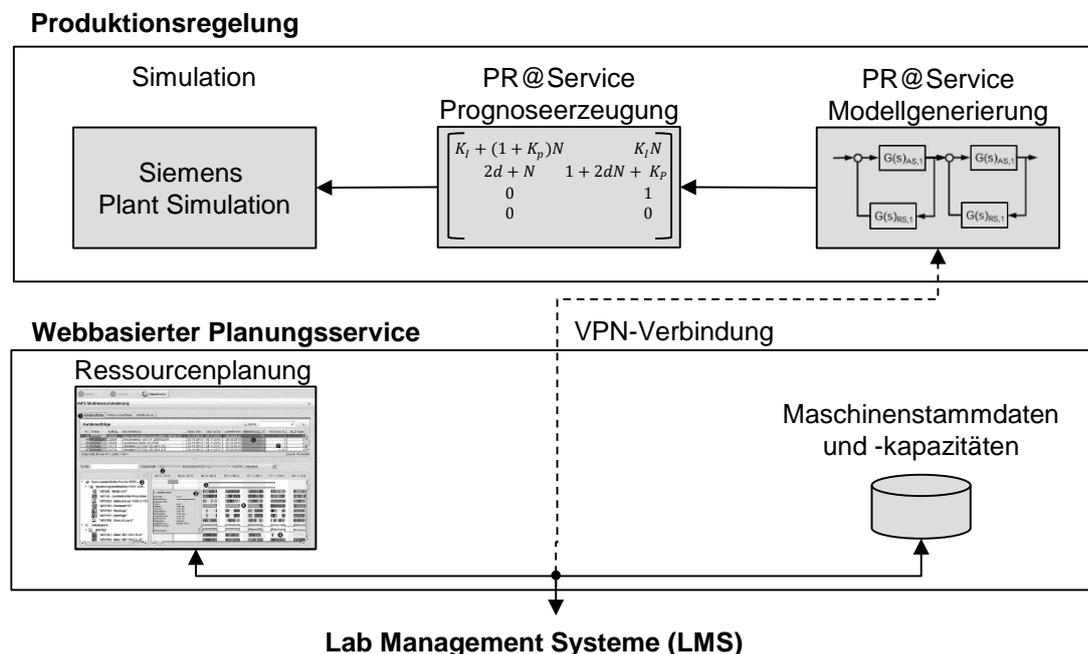


Abbildung 54: Schematische Darstellung des betrachteten Fertigungsprozesses um die Softwaremodule

Über eine temporäre VPN-Verbindung werden zyklisch die Informationen zum aktuellen Produktionszustand und die Auftragsfreigabe empfangen. Diese Infor-

9.4 Simulationsbegleitende Umsetzung und Validierung

mationen dienen der Aktualisierung der Parameter der modellierten Arbeitssysteme sowie der Simulation der Auftragsabwicklung (Berger et al. 2018a). In einem weiteren Schritt erfolgt die Erstellung einer Prognose hinsichtlich der Termintreue der zukünftigen Fertigungsaufträge. Wird eine Instabilität in der Auftragsabwicklung durch das Hurwitz-Kriterium erkannt, stößt dies eine Simulationsstudie für die Produktion von Fertigungsaufträgen an.

Für die Validierung der Arbeiten wurde die Fertigung von 19.326 Brillengläsern über einen Zeitraum von 12 Produktionstagen untersucht. Fertigungsaufträge mit prozessbedingtem Ausschuss wurden bei der Betrachtung nicht berücksichtigt. Im genannten Zeitraum erfolgte die Fertigung im Dreischichtbetrieb an sechs Arbeitstagen.

Zur Überprüfung und Beurteilung des Prognoseverfahrens wurden für das vorgestellte Anwendungsbeispiel vier Simulationsszenarien erstellt, die Tabelle 16 enthält. Die Bewertung der Szenarien erfolgt hinsichtlich der Wirksamkeit auf die logistische Zielgröße der Termintreue. In der Simulationsstudie werden verschiedene Maßnahmen ergriffen, wenn die Prognose eine voraussichtliche Verfehlung der Termintreue zeigt. Aufgrund der Vorgabe der Produktionsstätte, First-In-First-Out (FIFO), wurden Maßnahmen zur Reihenfolgebildung in den Simulationsszenarien nicht berücksichtigt. Stattdessen wurden nur Maßnahmen der Rückstandsregelung (vgl. Tabelle 6) ergriffen.

Szenario I nutzt Möglichkeiten für Überstunden und Zusatzschichten in den Arbeitssystemen AS 1, 2 und 7. Bei der Umsetzung des Szenarios wird an den AS 1 und 2 früher mit der Produktion begonnen.

Tabelle 16: Übersicht der Simulationsszenarien

Ergriffene Maßnahmen	Arbeits-system (AS)	Szenario
Überstunden/ Zusatzschichten	1, 2, 7	I
Auftragsteilung	2, 3, 5, 6	II
Höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit	2, 4, 5, 6	III
Auftragsteilung und höhere Bearbeitungsgeschwindigkeit	2, 4	IV

Für Szenario II seien beispielhaft die Rüstaufwände betrachtet. Dieses Szenario verteilt die Fertigungsaufträge gemäß dem FIFO-Prinzip an den Arbeitsstationen. Die Brillengläser eines Auftrags werden an unterschiedlichen Maschinen gefertigt. Dies kann an vier AS umgesetzt werden.

In Szenario III erfolgt die Regelung über die standardisierten Bearbeitungsgeschwindigkeiten hinaus bis zur maximalen Maschinenleistung. Dies ist an den vier aufgeführten AS möglich (vgl. Tabelle 16).

Zuletzt werden in Szenario IV die Maßnahmen des Auftragsplittings und der Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeiten an den AS 2 und 4 angewendet.

9.4.3 Ergebnisse der Simulationsstudie

Es folgt die Zusammenfassung der Ergebnisse des Prognoseverfahrens auf Basis der regelungstechnischen Modellierung und der vier Simulationsszenarien. Zur Beurteilung einer binären Prognose, wie dem Hurwitz-Kriterium, eignet sich die Wahrheitsmatrix (Konfusionsmatrix) (Feindt und Kerzel 2015). Dazu wird die Termintreue jedes produzierten Auftrags mit dem Ergebnis des Kriteriums verglichen. Dabei können folgende vier mögliche Fälle auftreten:

1. Richtig positiv: Der Auftrag wird termingerecht gefertigt und die Prognose hat dies richtig angezeigt.
2. Falsch negativ: Der Auftrag ist verspätet, aber die Prognose hat ihn fälschlicherweise als termingerecht eingestuft.
3. Falsch positiv: Der Auftrag ist termingerecht, aber die Prognose hat diesen als verspätet eingestuft.
4. Richtig negativ: Der Auftrag ist verspätet und die Prognose hat dies richtig angezeigt.

In den Fällen 1 und 4 ist die Prognose richtig, in den anderen beiden Fällen liegt ein Fehler in der Vorhersage vor. Abbildung 55 links zeigt die Prognose über die 12-tägige Simulationsstudie termingerechter Fertigstellung der Aufträge sowie eine Gegenüberstellung der Fälle 1 und 2.

Der rechte Teil der Abbildung 55 zeigt die Wahrheitsmatrix mit der Prognose zur Termintreue und Verspätung für den Betrachtungszeitraum von 12 Tagen. Die Auswertung zeigt, dass eine Termintreue der Brillenglasproduktion zu 93,99 % (Fall 1) und eine Verspätung mit 88,07 % (Fall 4) richtig erkannt wird. In 11,93 %

9.4 Simulationsbegleitende Umsetzung und Validierung

der Aufträge wird eine Verspätung nicht erkannt (Fall 2) und in 6,1 % wurde die Verspätung des Auftrags falsch prognostiziert (Fall 3).

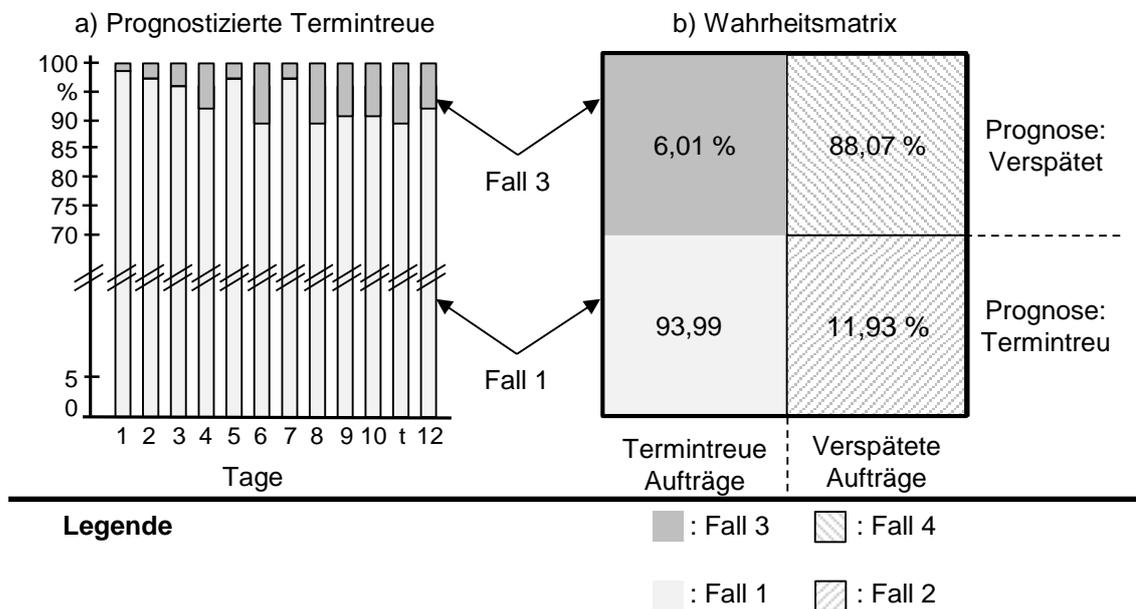


Abbildung 55: Grafische Darstellung der Prognosequalität

Die Termintreue der Fertigung lag im Untersuchungszeitraum bei ursprünglich 91,4 % und findet sich als Szenario 0 in der nachfolgenden Tabelle 17. Über die Termintreue innerhalb der betrachteten Prozesskette (Abbildung 51) werden die Kenngrößen mittlere Durchlaufzeit, die Ausbringung von Brillengläsern und das *Einsparungspotenzial* betrachtet (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Ergebnisse der Simulationsstudie der Brillenglasfertigung

Kennzahl	Einheit	Szenario				
		0	I	II	III	IV
Termintreue	%	91,40	91,10	91,73	91,64	92,03
Mittlere Durchlaufzeit	mm:ss	5:29	5:46	5:12	5:17	5:06
Ausbringung	#Glas	19326	19188	19464	19324	19524
Einsparungspotenzial	€	0	-579,6	579,6	411,6	831,6

Die Einsparung ergibt sich durch die höhere Produktionsleistung auf Grundlage einer Expertenschätzung und des Preises für ein durchschnittliches Brillenglas. Es

9 Technische Umsetzung und Validierung

zeigt sich, dass die Szenarien einen unterschiedlichen Einfluss auf die erhobenen Kennzahlen besitzen.

In Szenario I wird an den zwei Arbeitssystemen Taping und Blocking eine zusätzliche Schicht eingefügt. Es zeigt sich in der Simulation, dass sich diese Maßnahme negativ auf die betrachteten Kennzahlen auswirkt. Durch den standardmäßigen Dreischichtbetrieb können die Zusatzschichten nur zu Beginn der Arbeitswoche durchgeführt werden. Durch den begrenzten Lagerplatz im Produktionssystem ist dieses Potenzial nicht nutzbar. Mit dieser Maßnahme reduzieren sich die Termintreue um 0,3 % und die Ausbringung um 138 Brillengläser gegenüber der realen Auftragsplanung.

In den Szenarien II und III ergibt sich bei allen drei Kenngrößen eine positive Entwicklung. Mit dem gezielten Auftragsplitting und einer Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeiten an jeweils vier Arbeitssystemen ergibt sich ein positiver Effekt. Zudem können in der gleichen Produktionszeit noch weitere Aufträge vorgezogen werden.

Das Szenario IV kombiniert die Maßnahmen Auftragsplitting und Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit. Dies führt zur größten Verbesserung der Kennzahlen im Vergleich der vier Szenarien. Neben der Steigerung der Termintreue um 0,63 % kann auch die Ausbringung des Fertigungssystems um 198 Brillengläser gesteigert werden. Mit dieser Steigerung ermöglicht sich ein Potenzial im Umfang von 831,60 € im Betrachtungszeitraum.

In Abbildung 56 werden die Simulationsergebnisse der betrachteten Szenarien grafisch in Bezug auf die Kenngrößen Termintreue und Ausbringung gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass die Maßnahmen für die Produktionsregelung gezielt eingesetzt werden müssen, um keinen negativen Effekt zu erzeugen. In der hochautomatisierten Fertigung von Brillengläsern lässt sich durch die Produktionsregelung auf Basis der Prognosemethode eine Erhöhung der Termintreue erreichen.

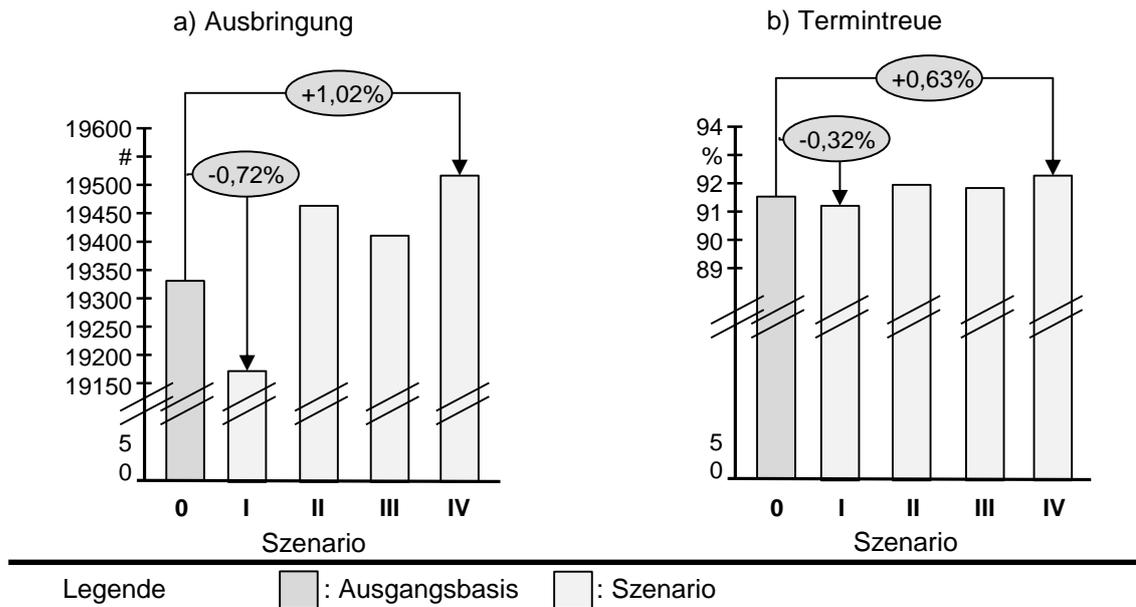


Abbildung 56: Ergebnis der Simulationsstudie hinsichtlich Ausbringung (links) und Termintreue (rechts)

9.5 Technisch-Wirtschaftliche Bewertung

9.5.1 Technische Bewertung

Grundlage der technischen Bewertung sind die Anforderungen, die in Abschnitt 3.4 definiert wurden. Über den betrachteten Anwendungsfall hinaus folgt eine kritische schriftliche Diskussion der Ergebnisse der vorliegenden Arbeit.

Zunächst werden die allgemeinen Entwicklungsprinzipien von Systemen einer Bewertung unterzogen.

Übertragbarkeit

Der Einsatz der Produktionsregelung mit CPS ist für verschiedene Branchen, die eine Fertigung besitzen, entwickelt worden. Zur Sicherstellung der Übertragbarkeit wurde sowohl bei der IT-Architektur als auch bei der Modellierung auf einen generischeren Ansatz geachtet. Durch die Nutzung von Services in der Cloud können beispielsweise die verwendeten mathematischen Methoden der Stabilitätsanalyse auf weitere Anwendungen übertragen werden.

Skalierbarkeit

Die Methode zur Stabilitätsberechnung, das Hurwitz-Kriterium, ist für beliebig große Systeme nutzbar. Ebenso skalierbar ist die Bildung von Übertragungsfunktionen. Durch die Nutzung von cloudbasierten Systemen lässt sich die benötigte Rechenleistung flexibel an die Größe der Produktion anpassen. So bestehen auch keine Einschränkungen hinsichtlich der Anzahl der Anlagen und der durchzuführenden Aufträge. Die Anforderung der Skalierbarkeit wird somit durch das System erfüllt.

Transparenz

Durch die Aussagefähigkeit zur Stabilität für jeden Auftrag ergibt sich eine Transparenz sowohl für alle aktuellen als auch für die zukünftigen Aufträge. Mit dem beschriebenen Verfahren zur Stabilitätsbeurteilung kann jedoch keine Aussage über den Grund der Instabilität getätigt werden.

Neben allgemeinen Entwicklungsprinzipien werden auch spezifische Anforderungen an das in der vorliegenden Arbeit entwickelte System gestellt. Die Erfüllung dieser Anforderungen ist Gegenstand der folgenden Diskussion.

Integration von inhomogenen Systemelementen

Die entwickelte Referenzarchitektur für die Produktionsregelung sieht etablierte Standards, wie OPC UA, vor. Dies gewährleistet die vertikale Vernetzung von der Feldebene bis zur übergeordneten Ebene. Mit den implementierten Schnittstellen zu Cloudlösungen ergibt sich die Möglichkeit der vertikalen Vernetzung über die Unternehmensgrenzen hinweg. Im Anwendungsbeispiel könnten der webbasierte Planungsservice sowie der Service zur Stabilitätsberechnung entsprechend angebunden werden. Mit den gewählten Kommunikationsstandards und Lösungsansätzen können IT-Systeme unterschiedlichen Ursprungs zusammenarbeiten. Dies verdeutlicht, dass inhomogene Systemelemente nahtlos in die entwickelte Architektur integriert, werden können.

Reaktionsvermögen der Regelung von Ereignissen

Mit der Definition von zusätzlichen prozesstechnischen Ereignissen (PE) kann auf ungeplante Produktionsereignisse reagiert werden. Hierfür wurde eine Vorgehensweise auf Grundlage des Nyquist-Shannon-Abtasttheorems hergeleitet. Damit können die Produktionsabläufe mit einer minimalen Anzahl an zusätzlich notwendigen Produktionsereignissen beschrieben werden. Diese lassen sich je nach Konfiguration des Gesamtsystems zur Stabilitätsprognose nutzen.

Erstellen von übergreifenden Produktionsmodellen

Für die Produktionselemente AS, LE und TE wurden parametrierbare Standardmodelle entwickelt. Diese Modelle gestatten die Anpassung an die aktuellen Gegebenheiten einer Fertigung. Zudem wurden Vernetzungsvarianten vorgestellt, um eine Vielzahl von Fertigungssystemen modellieren zu können.

Voraussage der Entwicklung von logistischen Zielgrößen

Das prototypische Anwendungsbeispiel zeigt, dass die Termintreue anhand der Leistungskennlinie von Maschinen mittels einer Prognose mit dem Hurwitz-Kriterium überwacht werden kann. Durch die Modellierung mithilfe regelungstechnischer Funktionselemente lässt sich das in der Regelungstechnik etablierte Verfahren anwenden und die Ergebnisse auf die Produktion übertragen. Dies reduziert Schnittstellen und Transformationen der Ereignisse zwischen den Verfahren.

9.5.2 Wirtschaftliche Bewertung

Über die technische Bewertung hinaus findet im Folgenden eine Abschätzung des wirtschaftlichen Nutzens der Produktionsregelung von CPPS statt. Die wirtschaftliche Beurteilung ist eine Voraussetzung für den Einsatz in einem Unternehmen. Dazu müssen sich mittel- und langfristige Einsparpotenziale und Produktivitätssteigerungen einstellen, um somit einen Einsatz des entwickelten Systems zu rechtfertigen (Moll et al. 2004). Zur Berechnung der Wirtschaftlichkeit finden sich in der Literatur unterschiedliche Möglichkeiten (Impekoven 2013). Der wirtschaftliche Nutzen hängt von externen Faktoren ab, wie beispielsweise von der schwankenden Auftragslage. Daher beschränkt sich die Analyse auf eine statische Amortisationsdauer. Bei einer statischen Amortisationsrechnung wird im Gegensatz zur dynamischen Amortisationsrechnung vereinfachend von jährlich konstanten Rückflüssen ausgegangen (Formel (45)). Dieser Rückfluss kann im dargestellten Anwendungsbeispiel aufgezeigt werden. Das Ergebnis der Berechnung ist die benötigte Zeitspanne, nach der die Investitionskosten durch den monetären Rückfluss kompensiert werden können. Grundlage für die Berechnung ist das Anwendungsbeispiel aus dem Abschnitt 9.4.3. Dort ergeben sich Investitionskosten u.a. in Form von Sach-, Personal- und Wartungskosten (vgl. Tabelle 18).

Bei dem entwickelten System handelt es sich vorrangig um eine Softwarelösung; aus diesem Grund sind keine Hardwarekosten entstanden. Auf eine Nachrüstung etwa von Sensoren konnte im aufgeführten Anwendungsbeispiel verzichtet wer-

9 Technische Umsetzung und Validierung

den. Es wurden die von den Fertigungsressourcen bereitgestellten Produktionsdaten analysiert. Die Sachkosten beschränken sich auf Lizenzkosten, wie etwa zur Stabilitätsanalyse (SK1), für regelungstechnische Methoden zur Modellierung (SK2), auf jene zur Bearbeitung von Differentialgleichungen (SK3) und zur Anbindung von Datenbanksystemen (SK4)

Tabelle 18: Kosten der Implementierung der Produktionsregelung

Einmalige Investitionskosten - Sachkosten		
Position	Art	Kosten in Euro
SK1	Lizenz Stabilitätsanalyse	6.000 €
SK2	Lizenz Regelungstechnik	8.000 €
SK3	Lizenz Differentialgleichungen	3.500 €
SK4	Lizenz Datenbanksysteme	1.500 €
Summe der Sachkosten		17.500 €

Die Aufwände für Personal wurden auf Grundlage von vergleichbaren Projekten quantifiziert. Die wesentlichen Aufgaben sind die Implementierung der Stabilitätsberechnung (PK1) sowie die Erstellung der Modelle für die AS, LE und TE (PK2). Zur Umsetzung müssen die Schnittstellen zwischen Fertigungssystemen und IT-Systemen (PK3) eingerichtet werden; des Weiteren hat eine Integration der Produktionsregelung (PK4) zu erfolgen. Als letzter Punkt fallen Kosten für die Schulung der Mitarbeiter (PK5) an. Der Tagessatz für einen Softwareingenieur wird mit 720 € veranschlagt. Bei den Schulungskosten pro Tag sind vier Teilnehmer angesetzt.

Tabelle 19: Einmalige Personalkosten

Position	Art	Personen- tage	Kostensatz pro Tag in Euro	Kosten in Euro
PK1	Implementierung der Stabilitätsberechnung	5	720 €	3.600 €
PK2	Erstellung der Modelle für die Arbeits-, Lager- und Transporteinheiten	20	720 €	14.400 €
PK3	Schnittstellen zwischen Fertigungssystemen und den IT-Systemen	10	720 €	7.200 €
PK4	Integration der Produktionsregelung	10	720 €	7.200 €
PK5	Schulung der Mitarbeiter	12	720 €	8.640 €
Summe der Personalkosten				41.040 €

Zusätzlich zu den einmalig zu tätigen Investitionskosten sind die laufenden Betriebskosten (BK) zu betrachten. Die Kosten für die Wartung und Pflege der Systeme errechnen sich prozentual aus den Investitionskosten. Bei den Lizenzen liegen die jährlichen Wartungskosten bei 15 % des Investitionswertes. Die Kosten für die Leistungen der Cloudplattform belaufen sich auf 14.520 € pro Jahr. Gegenüber einer lokalen Lösung ergeben sich dennoch normalerweise Einsparungen durch die Nutzung von Clouddiensten (Möhring et al. 2017; Berger et al. 2015; Michels und Greinert 2012; Michael Bräuninger et al. 2012). So können sich durch eine cloudbasierte Lösung Einsparungen bei den Personalkosten einstellen, die in der vorliegenden Arbeit nicht weiter detailliert wurden. In Summe fallen jährliche Betriebskosten in Höhe von 17.145 € an.

Tabelle 20: Laufende Kosten

Einmalige Investitionskosten - Sachkosten			
Position	Art	Menge	Kosten in Euro
BK1		1	2.625 €
BK2		1	14.520 €
Summe der Betriebskosten			17.145 €

Die Zeitspanne der Amortisation berechnet sich aus dem Quotienten der gesamten Investitionskosten und dem jährlichen Nettorückfluss (Formel (45)) (Taschner 2013; Westkämper und Warnecke 2011). Zur Berechnung des Rückflusses werden die ermittelten Einsparungen (Abschnitt 9.4.3) um die jährlichen Betriebskosten reduziert (Formel (44)).

$$\begin{aligned}
 \text{Jährlicher Nettorückfluss} &= \text{Ersparnis} * \text{Produktionswochen} \\
 &= \frac{831,60 \text{ (€/Woche)} * 48 \text{ Wochen}}{2} = 19.958,40\text{€} \quad (44)
 \end{aligned}$$

Ausgehend von einem jährlichen Nettorückfluss in Höhe von 19.958,40 € ergibt sich gemäß Formel (44) eine Amortisationszeit von 3,78 Jahren.

$$\begin{aligned}
 t_{\text{Amortisation}} &= \frac{\text{Investitionskosten (€)}}{\text{jährlicher Nettorückfluss (€/Jahr)}} \\
 &= \frac{75.685,00 \text{ €}}{19.958,40 \text{ € pro Jahr}} = 3,78 \text{ Jahre} \quad (45)
 \end{aligned}$$

Eine Amortisationszeit von 3,78 Jahren ist für die Einführung eines Softwaresystems in ein Produktionsunternehmen in einem akzeptablen Bereich, da eine Nutzungsdauer von Softwaresystemen je nach Anwendung bei fünf Jahren liegt (BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN 2005). Zudem liegt eine betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer eines betriebswirtschaftlichen Softwaresystems, wie ERP-Software, bei einem Zeitraum von fünf Jahren. Da ERP-Produkte in der fertigen Industrie weit verbreitet sind, lässt sich diese Dauer als Vergleichsgröße heranziehen (Lödding et al. 2019). Die Skalierbarkeit der Modelle erlaubt eine weitere Senkung der Amortisationszeit bei der Fertigung mit einer höheren Anzahl an Produktionsressourcen.

9.6 Fazit

In diesem Kapitel wurden zwei Ansätze zur regelungstechnischen Modellierung und einer Prognosemethode erfolgreich validiert. Dabei handelte es sich um die prototypische Umsetzung der Produktionsregelung auf Basis einer regelungstechnischen Modellierung sowie um eine Prognosemethode, die am Beispiel einer realen Brillenglasfertigung angewendet wurde. Im ersten Schritt wurde das Prognoseergebnis mittels einer Wahrheitsmatrix dargestellt. Anschließend erfolgte die Bewertung der Produktionsregelung auf Basis einer Simulationsstudie. Die Ergebnisse zeigen, dass die aufgrund der Prognose getroffenen Maßnahmen zu einer Steigerung der Termintreue in der Produktion und zu einer Erhöhung der Ausbringung von Endprodukten führen können. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Produktionsregelung bestätigt zudem deren Integrationsfähigkeit im industriellen Umfeld.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Durch die Erhöhung der Transparenz in der Fertigung, basierend auf dem Status von Produktionsvorgängen und den Zuständen der Fertigungsressourcen, bietet sich produzierenden Unternehmen die Chance, diese Informationen für eine präzisere Produktionssteuerung zu nutzen. Mit der Integration neuer Technologien kann die Beachtung der geänderten Rahmenbedingungen des Marktes, wie etwa kürzere Lieferzeiten, eine hohe Variantenanzahl und hohe Termintreue gegenüber Endkunden, als Möglichkeit zur Steigerung von Marktanteilen verstanden werden. Zur Umsetzung der Potenziale bedarf es einer Produktionsregelung, die gezielt die notwendigen Maßnahmen vor dem Start des Auftrags einleitet. Die Analyse der wissenschaftlichen Ansätze zeigt Konzepte für die Produktionsregelung von CPPS, welche jedoch nicht in einer ganzheitlichen Methode umgesetzt sind. Um diese Lücke zu schließen, wurde in der vorliegenden Arbeit eine Produktionsregelung für CPPS entwickelt, die aufgrund aktueller Informationen und Ereignisse eine Prognose für den Produktionszustand erstellt und Regelmaßnahmen einleitet.

Auf Grundlage der Ausgangssituation, der formulierten Forschungsfragen sowie der Anforderungen an eine Produktionsregelung erfolgte die Untersuchung des Stands der Technik und der Wissenschaft zum Informationsmanagement. Im Weiteren wurden die Themenfelder Produktionssteuerung und -regelung bezüglich der Ansätze zu Modellierung und Prognosemethoden analysiert. Aufbauend auf dieser Analyse erfolgte die Ableitung und Konkretisierung des Handlungsbedarfs. Diese Ergebnisse mündeten in die Beschreibung des Gesamtsystems, das aus den vier Grundelementen *arbeitssystemorientiertes Informationssystem*, *regelungsbasierte Ereignisverarbeitung*, *regelungsbasierte Produktionsmodelle* und *zielgrößenorientierte Prognoseverfahren* besteht.

Das *arbeitssystemorientierte Informationssystem* setzt sich aus vier Bereichen zusammen. Die Grundlage ist die entwickelte Referenzarchitektur einer Produktionsregelung mit der Nutzung von Public Cloud Services und des Konzepts der Verwaltungsschale. Zudem werden die Kommunikationsstandards zwischen den verschiedenen Ebenen von der Fertigung bis zu den Public Cloud Services benannt. Zur Übertragung von notwendigen Informationen in die Produktionsregelung erfolgt die Erstellung von Datenmodellen. Ergänzend resultiert daraus die Imple-

mentierung einer Methode zur Informationsübermittlung in die Referenzarchitektur. Das Vorgehensmodell für die Implementierung wurde in Form eines Ablaufdiagrammes erstellt.

Für die *regelungsbasierte Ereignisverarbeitung* wurden die Rückmeldungen von den Fertigungsressourcen um produktionstechnische Ereignisse und deren Anzahlbestimmung mit dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem ergänzt. Im Weiteren erfolgte die Darstellung des Zusammenspiels zwischen den Regeleinheiten, den Arbeitssystemen und der Gestaltung der Regelmaßnahmen mittels Hüllkurven. Die drei möglichen Regelkreise wurden hinsichtlich der Verarbeitung von Ereignissen angepasst und die möglichen Regelungsmaßnahmen definiert.

Das zentrale Element der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung der *regelungsbasierten Produktionsmodelle*. Durch die entwickelten Grundmodelle für Arbeitssysteme, Logistik- und Transporteinheiten kann dann die Fertigung modelliert und simuliert werden. Hierfür wurden die drei Grundmodelle weiter ausdetailliert. Für die Arbeitssysteme wurden Leistungskennlinien auf Grundlage von Übertragungsfunktionen zweiter Ordnung implementiert. Anhand dieser Modellierungsart ist es möglich, flexibel auf aktuelle Gegebenheiten zu reagieren und die Leistungskennlinie von AS anzupassen.

Das letzte Element befasst sich mit der Entwicklung eines *zielgrößenorientierten Prognoseverfahrens*, dessen Ziel es ist, auf Grundlage der Modelle und aktuellen Informationen eine Stabilitätskennzahl zu berechnen. Hierfür wurden mehrere Verfahren untersucht und das Hurwitz-Kriterium ausgewählt. Das Hurwitz-Kriterium bietet die Möglichkeit, die Arbeiten aus der Modellierung weiterzuführen, und kann zur Prognose der aktuellen Situation herangezogen werden.

Für die prototypische Umsetzung, wofür eine Brillenglasfertigung betrachtet wurde, konnten ein Teil der Referenzarchitektur und das Vorgehensmodell angewendet werden. Eine Simulationsstudie auf Grundlage von realen Produktionsdaten ermöglichte das Validieren der Modellierung des Fertigungssystems und der Prognosemethode. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigte, dass sich die Produktionsregelung nach wenigen Jahren amortisiert. Die frühzeitige Prognose der Termintreue gestattet es, Regelungsmaßnahmen gezielt einzusetzen. So gelang mit der prototypischen Umsetzung der Beweis der technischen Realisierbarkeit und wirtschaftlichen Rentabilität.

10.2 Ausblick

Die Zielsetzung und die Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit basieren auf der Integration von regelungstechnischen Methoden zur gezielten Produktionsregelung und somit zur Steigerung der Termintreue. Da in Zukunft durch die Anwendung von künstlicher Intelligenz noch weitere Informationsquellen zur Verfügung stehen, besteht die Möglichkeit der Weiterentwicklung in den folgenden drei thematisch angrenzenden Bereichen.

In dieser Arbeit wird die gesamte benötigte Wertschöpfungskette eines Auftrags hinsichtlich der Stabilität berechnet. Wie beschrieben wurde, kann die Stabilität eines Systems mit weiteren Verfahren berechnet beziehungsweise ermittelt werden. Einige diese Verfahren können die Stabilität quantitativ berechnen und dem verantwortlichen Steuerer die Reserve zur Instabilität unter anderem grafisch darstellen. Dies könnte zur Erstellung eines Dashboards für Mitarbeiter einer Fertigung führen, was zu einer erhöhten Transparenz des Verfahrens führen würde.

Die entwickelten Modelle der Fertigungsressourcen sind generisch gehalten und dienen der Anwendung im realen Umfeld. Durch die Zusammensetzung der Modelle aus elementaren Verknüpfungen besteht die Möglichkeit, diese für spezielle Anwendungen weiter zu detaillieren und anzupassen. So können für spezifische Maschinentypen, wie Dreh- und Fräszentren sowie für neue Fertigungsmethoden, etwa die additive Fertigung oder Batteriezellfertigung, die Modelle weiterentwickelt werden.

Wie in der Arbeit dargestellt, geschieht die Einleitung der regelnden Maßnahmen durch die vorhandene Produktionssteuerung. In einer Weiterentwicklung der Produktionsregelung könnte die Durchführung der Maßnahmen durch eine Kombination aus einer unscharfen Ljapunov-Funktion und einer Fuzzy-Logik umgesetzt werden. Je nach aktuellem Zustand der Produktion wäre es möglich, die Maßnahmen der Fuzzy-Regelung zuzuordnen. Die Grundlagen hierfür wurden mit der Beschreibung der Hüllkurven gelegt. Mit der Prognose durch die unscharfe Ljapunov-Funktion und einer Fuzzy-Regelung ergibt sich ein vielversprechendes System zur Regelungen von Fertigungen.

11 Literaturverzeichnis

AAZAM und HUH 2014

Aazam, Mohammad & Huh, Eui-Nam, Fog Computing and Smart Gateway Based Communication for Cloud of Things in 2014 International Conference on Future Internet of Things and Cloud. Barcelona, Spain 2014, 10.1109/FiCloud.2014.83.

ABELE ET AL. 2016

Abele, Eberhard; Bauernhansel, Thomas; Reinhart, Gunther; Schuh, Günther, WGP Standpunkt Industrie 4.0 2016.

ABELE und REINHART 2011

Abele, Eberhard & Reinhart, Gunther, Zukunft der Produktion, München, Carl Hanser; Hanser, 978-3-446-42595-8 2011.

ADAMY 2014

Adamy, Jürgen, Nichtlineare Systeme und Regelungen, 2., bearb. und erw. Aufl., Berlin, Springer Vieweg, 978-3-642-45012-9, 10.1007/978-3-642-45013-6 2014.

ADOLPHS ET AL. 2016

Adolphs, P.; Auer, S.; Bedenbender, H.; Billmann, M.; SE, B.; Coskun, G., Statusreport - Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0 - Komponenten, Düsseldorf, Frankfurt am Main: VDI, ZVEI 2016.

ALDINGER 1986

Aldinger, L., Kurzfristige Fertigungssteuerung mit Leitständen in WT. Werkstattstechnik 1986.

AL-FUQAHA ET AL. 2015

Al-Fuqaha, Ala; Khreishah, Abdallah; Guizani, Mohsen; Rayes, Ammar; Mohammadi, Mehdi, Toward better horizontal integration among IoT services in IEEE Communications Magazine, 10.1109/MCOM.2015.7263375 2015.

SCHMIDT und PAWLETTA 2014

Schmidt, Artur & Pawletta, Thorsten, Hybride Modellierung fertigungstechnischer Prozessketten mit Energieaspekten in einer ereignisorientierten Simulationsumgebung, 10.13140/2.1.4850.5609 2014.

AULBACH 2010

Aulbach, Bernd, Gewöhnliche Differenzialgleichungen, 2. Aufl., München, Elsevier Spektrum Akad. Verl.; Spektrum Akad. Verl., 3-827-41492-X 2010.

BABICEANU und CHEN 2006

Babiceanu, Radu F. & Chen, F. Frank, Development and Applications of Holonic Manufacturing Systems in Journal of Intelligent Manufacturing, 10.1007/s10845-005-5516-y 2006.

BAMBERG 1996

Bamberg, Rainer, Entwicklung eines Werkzeuges zum Störungsmanagement in der Produktionsregelung, Berlin, Heidelberg, Springer, 3-540-61515-6 1996.

BAUER ET AL. 2014

Bauer, Wilhelm; Schlund, Sebastian; Marrenbach, Dirk, Industrie 4.0–Volkswirtschaftliche Potentiale für Deutschland in Bundesverband Informationswirtschaft, 2014.

BAUERNHANSL ET AL. 2014

Bauernhansl, Thomas; Hompel, Michael ten; Vogel-Heuser, Birgit, Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 978-3-658-04681-1 2014.

BAUM 2013

Baum, Dieter, Grundlagen der Warteschlangentheorie, Berlin, Springer Spektrum, 978-3-642-39631-1, 10.1007/978-3-642-39632-8 2013.

BECHTE 1984

Bechte, Wolfgang, Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung, Düsseldorf, VDI-Verlag 1984.

BENDUL & KNOLLMANN 2016

Bendul, Julia & Knollmann, Mathias, The Lead Time Syndrome of Manufacturing Control: Comparison of Two Independent Research Approaches in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2015.08.104 2016.

BERGER ET AL. 2015

Berger, Christoph; Wagner, Marcel; Hees, Andreas; Keller, Fabian; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, Intranet der Dinge und Dienste für intelligente Services in der Produktion in IM+io 2015.

BERGER ET AL. 2016

Berger, Christoph; Hees, Andreas; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, Characterization of Cyber-Physical Sensor Systems in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2015.12.019 2016.

BERGER ET AL. 2016

Berger, Christoph; Huber, Josef; Klöber-Koch, Jan; Schreiber, Martin; Braunreuther, Stefan; Richter, Christoph; Reinhart, Gunther, OpenServ4P- Offene, intelligente Services für die Produktion in ZWF, 10.3139/104.111639 2016.

BERGER ET AL. 2018

Berger, Christoph; Zipfel, Alexander; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, Approach for an Event-Driven Production Control for Cyber-Physical Production Systems 2018.

BERGER ET AL. 2018

Berger, Christoph; Hoffmann, Urs; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, Modeling, simulation, and control of production resource with a control theoretic approach in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2017.12.187 2018.

BERGER ET AL. 2019

Berger, Christoph; Fetzer, Alexander; Stykel, Tatjana; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, Stability Analysis of a Control-Theoretic Work System Model in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2019.04.238 2019.

BERLAK 2019

Berlak, Joachim, Konzeption, Realisierung und Validierung eines cloud-basierten Service zur eventbasierten Produktionsplanung und –steuerung in Ausgewählte Verfahren zur Optimierung des Ressourceneinsatzes und Flexibilisierung in der Fertigung 2019.

BETTENHAUSEN und KOWALEWSKI 2013

Bettenhausen, Kurt D. & Kowalewski, Stefan, Cyber-Physical Systems in VDI/VDE-Gesellschaft Mess-und Automatisierungstechnik 2013.

BEYERER ET AL. 2015

Beyerer, Jürgen; Jasperneite, Jürgen; Sauer, Olaf, Industrie 4.0 in at-Automatisierungstechnik 10, 10.1515/auto-2015-0068 2015.

BISCHOFF ET AL. 1999

Bischoff, Jürgen; Warnecke, H. J.; Westkämper, E.; Bullinger, H.-J., Ein Verfahren zur zielorientierten Auftragseinplanung für teilautonome Leistungseinheiten, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 3-540-66090-9 1999.

BLESSING & CHAKRABARTI 2009

BLESSING; CHAKRABARTI: DRM, A DESIGN RESEARCH METHODOLOGY. LONDON: SPRINGER VERLAG 2009. ISBN: 978-1-84882-586-4

BLOCK ET AL. 2016

Block, Christian; Morlock, Friedrich; Kühlenkötter Bernd, Ganzheitliche flexible

Vernetzung durch Erweiterung bestehender IT-Strukturen zu Serviceorientierten Architekturen mithilfe von Agentensystemen zur humanzentrierten Entscheidungsunterstützung in Megatrend Digitalisierung-Potenziale der Arbeits-und Betriebsorganisation 2016.

BOGNER ET AL. 2018

Bogner, Eva; Löwen, Ulrich; Franke, Jörg, Bedeutung der zukünftigen Produktion kundenindividueller Produkte in Losgröße 1 in Interdisziplinäre Perspektiven zur Zukunft der Wertschöpfung, 10.1007/978-3-658-20265-1_6 2018.

BONGAERTS ET AL. 2000

Bongaerts, Luc; Monostori, László; McFarlane, Duncan; Kádár, Botond, Hierarchy in distributed shop floor control in Computers in Industry, 10.1016/S0166-3615(00)00062-2 2000.

BORANGIU ET AL. 2015

Borangiu, Theodor; Thomas, André; Trentesaux, Damien, Service Orientation in Holonic and Multi-agent Manufacturing, Cham, Springer International Publishing, 978-3-319-15159-5 2015.

BORANGIU ET AL. 2016

Borangiu, Theodor; Trentesaux, Damien; Thomas, André, Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing, Cham, Springer International Publishing, 978-3-319-30335-2 2016.

BOWEN ET AL. 2019

Bowen, Zou; Jian, Liu; Wenlin, Wang; Zhenyu, Yan; Gaojun, Liu; Jun, Yang; Ming, Yang, Development of an Interaction Simulator for the Scenario Analysis of Physical Protection Systems in IEEE Access, 10.1109/ACCESS.2019.2924239 2019.

BRECHER ET AL. 2014

Brecher, C.; Behnen, D.; Brumm, M.; Carl, C.; Ecker, C.; Herfs, W.; Klement, R.; Königs, M.; Komma, T.; Lohse, W.; Malik, A.; Müller, S.; Özdemir, D., Virtualisierung und Vernetzung in Produktionssystemen in Integrative Produktion 2014.

BREITHAUPT 2001

Breithaupt, Jan-Wilhelm, Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen, Düsseldorf, VDI Verlag, 3-183-57102-1 2001.

BRINZER und BANERJEE 2017

Brinzer, Boris & Banerjee, Amardeep, Komplexitätsbewertung im Kontext Cyber-physischer Systeme in ZWF, 10.3139/104.111709 2017.

BROY 2013

Broy, Manfred, Engineering Cyber-Physical Systems: Challenges and Foundations in Complex Systems Design & Management, 10.1007/978-3-642-34404-6_1 2013.

BROY und GEISBERGER 2012

Broy, Manfred & Geisberger, Eva, Integrierte Forschungsagenda Cyber-Physical Systems, Berlin, Heidelberg, Springer, 978-3-642-29098-5 2012.

BRUNS und DUNKEL 2010

Bruns, Ralf & Dunkel, Jürgen, Event-Driven Architecture, Berlin, Springer; Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 978-3-642-02439-9 2010.

BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN 2005

Bundesministerium der Finanzen <<https://datenbank.nwb.de/Dokument/Anzeigen/182620/> - 04.09.2020.

BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND ENERGIE 2016

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, Struktur der Verwaltungsschale 2016.

BURGER 1992

Burger, Claus, Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-642-77317-4 1992.

BURKHALTER 2010

Burkhalter, Jean Philippe, Steuerungs- und Regelungsstrategien für produktionstechnische Systeme, Saarbrücken, Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften, 978-3-838-11906-9 2010.

BYRNE ET AL. 1995

Byrne, G.; Dornfeld, D.; Inasaki, I.; Ketteler, G.; König, W.; Teti, R., Tool Condition Monitoring (TCM) — The Status of Research and Industrial Application in CIRP Annals, 10.1016/S0007-8506(07)60503-4 1995.

CHANG ET AL. 2014

Chang, Hyunseok; Hari, Adiseshu; Mukherjee, Sarit; Laksman T.V., IEEE Conference on Computer Communications workshops (INFOCOM WKSHPS), 2014, Piscataway, NJ, IEEE 2014.

CHEN 2004

Chen, Guanrong, Stability of nonlinear systems in Encyclopedia of RF and Microwave Engineering 2004.

CLOUTIER ET AL. 2009

Cloutier, Robert; Muller, Gerrit; Verma, Dinesh; Nilchiani, Roshanak; Hole, Erik; Bone, Mary, The Concept of Reference Architectures in Systems Engineering, 10.1002/sys.20129 2009.

DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, Wilhelm, Theorie der Produktionsplanung und -steuerung, Dordrecht, New York, Springer, 978-3-642-00632-6, 10.1007/978-3-642-00633-3 2009.

DASHKOVSKIY ET AL. 2007

Dashkovskiy, Sergey; Ruffer, Björn S.; Wirth, Fabian R., An ISS small gain theorem for general networks in Mathematics of Control, Signals, and Systems, 10.1007/s00498-007-0014-8 2007.

DASHKOVSKIY ET AL. 2011

Dashkovskiy, Sergey; Görges, Michael; Kosmykov, Michael; Mironchenko, Andrii; Naujok, Lars, Modeling and stability analysis of autonomously controlled production networks in Logistics Research, 10.1007/s12159-011-0049-6 2011.

DEAECTO ET AL. 2012

Deaecto, Grace S.; Geromel, Jose C.; Galbusera, Luca; Bolzern, Paolo, Extended Small Gain Theorem with application to time-delay switched linear systems in 2012 IEEE 51st Annual Conference on Decision and Control (CDC 2012). Maui, HI, USA 2012, 10.1109/CDC.2012.6427114.

DIEDRICH und RIEDL 2015

Diedrich, Christian & Riedl, Matthias, Integration von Automatisierungsgeräten in Industrie-4.0-Komponenten in Handbuch Industrie 4.0, 10.1007/978-3-662-45537-1_63-1 2015.

DIN 69900, Projektmanagement - Netzplantechnik; Beschreibungen und Begrif 2009-01.

DIN 60050-351, Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik. Berlin: Beuth 2014.

DIN SPEC 91329, Erweiterung des EPCIS-Ereignismodells um aggregierte Produktionsereignisse zur Verwendung in betrieblichen Informationssystemen. Berlin: Beuth 2016.

DIN SPEC 91345, Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Berlin: Beuth 2016.

DIN SPEC 92222, Referenzarchitektur für die Industrielle Cloud Federation. Berlin: Beuth 2021a.

DOMBROWSKI 1988

Dombrowski, Uwe, Qualitätssicherung im Terminwesen der Werkstattfertigung, Düsseldorf, VDI Verl, 978-3-181-45902-7 1988.

DUFFIE ET AL. 2008

Duffie, N. A.; Roy, D.; Shi, L., Dynamic modeling of production networks of autonomous work systems with local capacity control in CIRP Annals, 10.1016/j.cirp.2008.03.018 2008.

DUFFIE ET AL. 2014

Duffie, N.; Chehade, A.; Athavale, A., Control Theoretical Modeling of Transient Behavior of Production Planning and Control in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2014.01.099 2014.

DUFFIE ET AL. 2016

Duffie, Neil; Bendul, Julia; Windt, Katja; Knollmann, Mathias, Lead time instability and its mitigation in production work systems in CIRP Annals 1, 10.1016/j.cirp.2016.04.120 2016.

DUFFIE ET AL. 2017

Duffie, N.; Bendul, J.; Knollmann, M., An analytical approach to improving due-date and lead-time dynamics in production systems in Journal of Manufacturing Systems, 10.1016/j.jmsy.2017.10.001 2017.

DUFFIE und FALU 2002

Duffie, N. & Falu, I., Control-Theoretic Analysis of a Closed-Loop PPC System in CIRP Annals - Manufacturing Technology, 10.1016/S0007-8506(07)61541-8 2002.

DUFFIE und SHI 2010

Duffie, Neil A. & Shi, Leyuan, Dynamics of WIP Regulation in Large Production Networks of Autonomous Work Systems in IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 10.1109/TASE.2009.2036374 2010.

DYCKHOFF und SPENGLER 2010

Dyckhoff, Harald & Spengler, Thomas Stefan, Produktionswirtschaft, Berlin, Springer, 978-3-642-13684-9 2010.

ECKERT und BRY 2009

Eckert, Michael & Bry, François, Complex Event Processing (CEP) in Informatik-Spektrum 2, 10.1007/s00287-009-0329-6 2009.

ENGELHARDT 2015

Engelhardt, Philipp Ronald, System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage, München, Utz, 978-3-831-64472-8 2015.

FALLENBECK und ECKERT 2014

Fallenbeck, Niels & Eckert, Claudia, IT-Sicherheit und Cloud Computing in Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik 2014.

FEINDT und KERZEL 2015

Feindt, Michael & Kerzel, Ulrich, Prognosen bewerten, Aufl. 2015, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-662-44683-6, 10.1007/978-3-662-44683-6 2015.

FISCHÄDER 2007

Fischäder, Holm, Störungsmanagement in netzwerkwerkförmigen Produktionssystemen, 1. Aufl, Wiesbaden, Dt. Univ.-Verl., 978-3-8350-0539-6 2007.

FISCHER 2010

Fischer, Hieronymus, Innovation im Mittelstand am Beispiel Der Senkung Von Mobilitätskosten Durch „Schwarmintelligenz“ in Cyber-Physical Systems, 10.1007/978-3-642-14901-6_3 2010.

FISCHERMANNNS 2013

Fischermanns, Guido, Praxishandbuch Prozeßmanagement, 11., bearb. Aufl., Gießen, Schmidt, 9783921313893 2013.

FISEL und LANZA 2016

Fisel, J. & Lanza, G., Wandlungsfähigkeit in der Endmontage in wt Werkstattstechnik online 04, 10.37544/1436-4980-2016-04-53 2016.

FLEISCHMANN ET AL. 2018

Fleischmann, Hans; Kißkalt, Dominik; Krusemark, Stefan; Franke, Jörg, An Information Processing Framework Facilitating the Implementation of Condition Monitoring in Cyber-Physical Systems in Applied Mechanics and Materials, 10.4028/www.scientific.net/AMM.882.75 2018.

FÖLLINGER 2016

Föllinger, Otto, Regelungstechnik, Berlin, Offenbach, VDE Verlag GmbH, 978-3-8007-4202-8 2016.

FORRESTER 1973

Forrester, Jay Wright, Industrial dynamics, Students' ed., 8. print, Cambridge, Mass., MIT Press, 0262060035 1973.

FRANKE ET AL. 2014

Franke, Marco; Klein, Konstantin; Hribernik, Karl; Lappe, Dennis; Veigt, Marius; Thoben, Klaus-Dieter, Semantic Web Service Wrappers as a Foundation for Interoperability in Closed-loop Product Lifecycle Management in Proceedings of the 3rd International Conference in Through-life Engineering Services 0, 10.1016/j.procir.2014.07.020 2014.

FREITAG 2005

Freitag, Michael, Modellierung und Analyse von Produktionssystemen mit Methoden der nichtlinearen Dynamik, Berlin, Gito, 978-3-936-77145-9 2005.

FRESE 2000

Frese, Erich, Grundlagen der Organisation, 8., überarbeitete Auflage, 978-3-663-01527-7 2000.

GEISBERGER & BROY 2012

Geisberger, Eva & Broy, Manfred, agendaCPS, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg; Springer, 978-3-642-29099-2, 10.1007/978-3-642-29099-2 2012.

GENC 2015

Genc, Emin, Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement, 978-3-8316-4525-1 2015.

MEYER ET AL. 2013

Meyer, Gerrit; Knüppel, Konja; Walter Schepers, Simon; Nyhuis, Peter, Störgrößenmanagement in Produktionssystemen in ZWF 2013.

GLEIBNER und MEIER 2001

Gleißner, Werner & Meier, Günter, Wertorientiertes Risiko-Management für Industrie und Handel, Wiesbaden, Gabler Verlag, 978-3-322-90747-9 2001.

GOLL 2014

Goll, Joachim, Architektur- und Entwurfsmuster der Softwaretechnik, 2., aktualisierte Aufl., Wiesbaden, Springer, 978-3-658-05531-8 2014.

GOLL und DAUSMANN 2013

Goll, Joachim & Dausmann, Manfred, Architektur- und Entwurfsmuster der Softwaretechnik, Wiesbaden, s.l., Springer Fachmedien Wiesbaden, 978-3-8348-2432-5, 10.1007/978-3-8348-2432-5 2013.

GÖLZER 2017

Gölzer, Philipp, Big Data in Industrie 4.0 - Eine strukturierte Aufarbeitung von Anforderungen, Anwendungsfällen und deren Umsetzung, Erlangen-Nürnberg 2017.

GRANIG ET AL. 2018

Granig, Peter; Hartlieb, Erich; Heiden, Bernhard, Mit Innovationsmanagement zu Industrie 4.0, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden, 978-3-658-11666-8 2018.

GRONAU ET AL. 2019

Gronau, Norbert; Kern, Eva-Maria; Jonitz, Hendrik, Herausforderungen im Umgang mit Produktionsstörungen in Industrie 4.0 Management 6, 10.30844/I40M_19-6_S29-32 2019.

GRONAU und ULLRICH 2019

Gronau, Norbert & Ullrich, André, Auswirkungen der Digitalisierung – Implikationen und Handlungsempfehlungen für Transformation und betriebliche Weiterbildung in Logistik im Wandel der Zeit – Von der Produktionssteuerung zu vernetzten Supply Chains 2019.

GRÜNE 2006

Grüne, Lars, Stabilität und Stabilisierung linearer Systeme, Bayreuth 2006.

GRÜNE 2008

Grüne, Lars, Stabilität, Teil II: Lyapunov-Funktionen und Nichtlineare Systeme in Gewöhnliche differentialgleichungen, 10.1007/978-3-8348-9261-4_9 2008.

GRÜNE und JUNGE 2016

Grüne, Lars & Junge, Oliver, Lyapunov-Funktionen und Linearisierung in Gewöhnliche Differentialgleichungen, 10.1007/978-3-658-10241-8_8 2016.

GUT 2023

Gut, Matthias, Fluch und Segen digitaler Disruption für den deutschen Mittelstand in Digitalisierung, 10.1007/978-3-658-36634-6_8 2023.

GUTENSCHWAGER ET AL. 2017

Gutenschwager, Kai; Rabe, Markus; Spieckermann, Sven; Wenzel, Sigrid, Simulation in Produktion und Logistik, Berlin, Springer Vieweg, 9783662557457, 10.1007/978-3-662-55745-7 2017.

GUTOUNIG 2015

Gutounig, Robert, Wissen in digitalen Netzwerken, Wiesbaden, Springer, 978-3-658-02110-8_7 2015.

HABERFELLNER 2015

Haberfellner, Reinhard, Systems Engineering, 13., aktualisierte Aufl., Zürich, Orell Füssli, 978-3-280-04068-3 2015.

HÄCKELMANN ET AL. 2000

Häckelmann, Heiko; Petzold, Hans Joachim; Strahringer, Susanne, Kommunikationssysteme: Technik und Anwendungen, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-642-57242-5 2000.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, Rolf, Produktionsplanung und -steuerung (PPS), 2, Dusseldorf, VDI-Verlag, 978-3-184-00924-3 1989.

HALLER 1999

Haller, Martin, Bewertung der Flexibilität automatisierter Materialflußsysteme der variantenreichen Großserienproduktion, München, Utz Wiss, 3-896-75672-9 1999.

HAMANN 2008

Hamann, Tilo, Lernfähige intelligente Produktionsregelung, Berlin, GITO-Verl., 978-3-940-01933-2 2008.

HASAN ET AL. 2011

Hasan, Souleiman; Curry, Edward; Banduk, Mauricio; O'Riain, Seán, Toward Situation Awareness for the Semantic Sensor Web: Complex Event Processing with Dynamic Linked Data Enrichment in SSN 2011.

HAUPTVOGEL 2015

Hauptvogel, Annika, Bewertung und Gestaltung von cyber-physischer Feinplanung, 1. Aufl, Aachen, Apprimus Verlag, 978-3-863-59292-9 2015.

HEIDEL ET AL. 2017

Heidel, Roland; Hoffmeister, Michael; Hankel, Martin; Böbrich, Udo, Industrie4.0 Basiswissen RAMI4.0, 1. Auflage, Berlin, Beuth Verlag GmbH; VDE Verlag GmbH, 978-3-410-26482-8 2017.

HEINRICH & BURGHOLZER 1988

Heinrich, Lutz Jürgen & Burgholzer, peter, Informationsmanagement: Planung, Überwachung und Steuerung der Informations-Infrastruktur, Oldenbourg, Oldenbourg, 978-3-486-20866-5 1988.

HELBING 2005

Helbing, Dirk, Modeling and Optimization of Production Process: Lessons from Traffic Dynamics 2005.

HOPPE 2014

Hoppe, Stefan, Standardisierte horizontale und vertikale Kommunikation: Status und Ausblick in Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik, 10.1007/978-3-658-04682-8_16 2014.

HUBER 2016

Huber, Walter, Produktion der Zukunft in Industrie 4.0 in der Automobilproduktion, 10.1007/978-3-658-12732-9_9 2016.

HUTCHISON ET AL. 2008

Hutchison, David; Bassiliades, Nick; Governatori, Guido; Kanade, Takeo; Kittler, Josef; Kleinberg, Jon; Mattern, Friedemann; Mitchell, John C.; Naor, Moni; Nierstrasz, Oscar; Pandu Rangan, C.; Paschke, Adrian; Steffen, Bernhard; Sudan, Madhu; Terzopoulos, Demetri; Tygar, Doug; Vardi, Moshe Y.; Weikum, Gerhard, Rule representation, interchange and reasoning on the Web, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg; Springer, 978-3-540-88807-9, 10.1007/978-3-540-88808-6 2008.

GRAJA ET AL. 2017

I. Graja; A. Mechim; S. Kallel; N. Guermouche; A. H. Kacem, Demonstrating BPMN4CPS: Modeling and verification of cyber-physical systems, 2331-9860 2017.

IMPEKOVEN 2013

Impehoven, Christoph, Wirtschaftlichkeitsberechnung in Software-Entwicklung für dynamische Portfolioallokation und Risikomanagement, 10.1007/978-3-658-01182-6_5 2013.

ISO/IEC 2382 ISO/IEC 2382, Information technology - Vocabulary 2015.

JANSCHER 2010

Janschek, Klaus, Systementwurf mechatronischer Systeme, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 978-3-540-78877-5, 10.1007/978-3-540-78877-5 2010.

JEKEN ET AL. 2012

Jeken, O.; Duffie, N.; Windt, K.; Blunck, H.; Chehade, A.; Rekersbrink, H., Dynamics of autonomously acting products and work systems in production and assembly in CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 4, 10.1016/j.cirpj.2012.09.012 2012.

JIAO ET AL. 2009

Jiao, Jianxin; Xu, Qianli; Wu, Zhang; Ng, Ngai-Kheong, Coordinating product, process, and supply chain decisions in Engineering Applications of Artificial Intelligence, 10.1016/j.engappai.2009.02.002 2009.

JÜNEMANN und BEYER 1998

Jünemann, Reinhardt & Beyer, Andreas, Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen, 2. Aufl, Berlin [u.a.], Springer, 3540645144 1998.

KAGERMANN ET AL. 2013

Kagermann, Henning; Wahlster, Wolfgang; Helbig, Johannes, Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 in Acatech 2013.

KAGERMANN und WAHLSTER 2013

Kagermann, Henning & Wahlster, Wolfgang, Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 2013.

KAISER ET AL. 2021

Kaiser, Jan-Philipp; Mitschke, Norbert; Stricker, Nicole; Heizmann, Michael; Lanza, Gisela, Konzept einer automatisierten und modularen Befundungsstation in der wandlungsfähigen Produktion in ZWF, 10.1515/zwf-2021-0070 2021.

KEMPKES ET AL. 2018

Kempkes, Jan A.; Suprano, Francesco; Wömpener, Andreas, Produktion 4.0 mit den richtigen Kennzahlen steuern in Controlling & Management Review 4, 10.1007/s12176-018-0017-y 2018.

KENNEMANN ET AL. 2011

Kennemann, Marco; Eickemeyer, Steffen C.; Nyhuis, Peter, Kennzahlen für ein dynamisches Produktionscontrolling in ZWF 11, 10.3139/104.110636 2011.

KERN und ZÄPFEL 1996

Kern, Werner & Zäpfel, Günther, Handwörterbuch der Produktionswirtschaft, 2, Stuttgart, Schäffer-Poeschel Verlag, 9783791080444 1996.

KIM und DUFFIE 2005

Kim, Jin-Hyung & Duffie, Neil A., Design and Analysis of Closed-Loop Capacity Control for a Multi-Workstation Production System in CIRP Annals - Manufacturing Technology 1, 10.1016/S0007-8506(07)60143-7 2005.

KIRRMANN ET AL. 2009

Kirrmann, Hubert; Weber, Karl; Kleineberg, Oliver; Weibel, Hans, HSR: Zero recovery time and low-cost redundancy for Industrial Ethernet in 2009 IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation. Palma de Mallorca, Spain 2009, 10.1109/ETFA.2009.5347037.

KISTNER und STEVEN 2001

Kistner, Klaus-Peter & Steven, Marion, Produktionsplanung, Heidelberg, s.l., Physica-Verlag HD, 978-3-642-57546-4, 10.1007/978-3-642-57546-4 2001.

KLAUKE 2021

Klauke, Sabine, Multi-Domain Combat Cloud – Infrastruktur und Innovationstreiber für europäische Wettbewerbsfähigkeit in Künstliche Intelligenz erfolgreich umsetzen, 10.1007/978-3-658-34670-6_2 2021.

KLEIN 2018

Klein, Hans-Werner, Erst aufräumen, dann rechnen in Qualität und Data Science in der Marktforschung, 10.1007/978-3-658-19660-8_17 2018.

KLETTI 2007

Kletti, Jürgen, Konzeption und Einführung von MES-Systemen, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 978-3-540-34309-7 2007.

KLETTI und DEISENROTH 2012

Kletti, J. & Deisenroth, R., MES-Kompodium: Ein Leitfaden am Beispiel von HYDRA, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-642-32580-9 2012.

KLETTI und SCHUMACHER 2011

Kletti, Jürgen & Schumacher, Jochen, Die perfekte Produktion, Berlin, Springer, 978-3-642-13845-4 2011.

KLUG 2017

Klug, Florian, Das Perlenkettenprinzip der stabilen Auftragsfolge in der Automobillogistik in Automobillogistik, 10.1007/978-3-658-11103-8_8 2017.

KNOLLMANN ET AL. 2014

Knollmann, Mathias; Windt, Katja; Duffie, Neil, Evaluation of Capacity Control and Planned Lead Time Control in a Control-theoretic Model in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2014.01.061 2014.

KNOLLMANN 2014

Knollmann, Mathias, Logistic Target Achievement In Scope Of The Lead Time Syndrome Of Manufacturing Control 2014.

KNOLLMANN und WINDT 2013

Knollmann, Mathias & Windt, Katja, Control-theoretic Analysis of the Lead Time Syndrome and its Impact on the Logistic Target Achievement in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2013.05.017 2013.

KÖCHER und ROMEIKE 2016

Köcher, Anette & Romeike, Frank, Besonderheiten des Logistik-Risikomanagements im Handel in Risikomanagement in der Logistik, 10.1007/978-3-658-05896-8_12 2016.

KOETHER 2018

Koether, Reinhard, Taschenbuch der Logistik, 5., aktualisierte Auflage, München, Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 9783446457676, 10.3139/9783446457676 2018.

KOLBERG ET AL. 2017

Kolberg, D.; Berger, C.; Pirvu, B.-C.; Franke, M.; Michniewicz, J., CyProF – Insights from a Framework for Designing Cyber-Physical Systems in Production Environments in Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 10.1016/j.procir.2016.11.007 2017.

KOLBERG ET AL. 2017

Kolberg, Dennis; Knobloch, Joshua; Zühlke, Detlef, Towards a lean automation interface for workstations in International Journal of Production Research 10, 10.1080/00207543.2016.1223384 2017.

KOLBERG 2019

Kolberg, Dennis, Entwicklung einer Referenzarchitektur zur Realisierung von Methoden der Lean Production mittels digitaler Technologien, 1. Auflage, München, GRIN Verlag, 978-3-668-92690-5, Dennis 2019.

KRALLMANN ET AL. 2013

Krallmann, Hermann; Bobrik, Annette; Levina, Olga, Systemanalyse im Unternehmen, 6., überarb. und erw. Aufl., München, Oldenbourg-Verl., 978-3-486-72982-5, 10.1524/9783486729825 2013.

KRCMAR 2016

Krcmar, Helmut, Informationsmanagement, 4, Berlin, Springer, 978-3-662-45863-1 2016.

KREOWSKI ET AL. 2011

Kreowski, Hans-Jörg; Scholz-Reiter, Bernd; Thoben, Klaus-Dieter, Dynamics in Logistics, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-642-11995-8, 10.1007/978-3-642-11996-5 2011.

KREOWSKI ET AL. 2013

Kreowski, Hans-Jörg; Scholz-Reiter, Bernd; Thoben, Klaus-Dieter, Dynamics in logistics, Berlin, Springer, 978-3-642-35966-8 2013.

KROPP und MAASEM 2015

Kropp, Sebastian & Maasem, Christian, Hochauflösende Rückmeldedaten in Prognose- hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik 2015.

KROPP und SCHUH 2014

Kropp, Sebastian & Schuh, Guenther, Event-Driven Production Control based on Sensor Events, 10.1109/SmartSysTech.2014.7156031 2014.

KRUEGER 2014

Krueger, Joerg, Neue Potentiale für die Automatisierung 2014.

KRUMEICH ET AL. 2014

Krumeich, J.; Werth, D.; Loos, P.; Schimmelpfennig, J.; Jacobi, S., Advanced planning and control of manufacturing processes in steel industry through big data analytics: Case study and architecture proposal 2014.

KRUMEICH 2015

Krumeich, Julian, Towards an Extended Metamodel of Event driven Process Chains to Model Complex Event Patterns in 2nd International Workshop on Event Modeling and Processing in Business Process Management 2015.

KRUSE & SCHEER 1995

Kruse, Christina & Scheer, August-Wilhelm, Modellierung und Analyse dynamischen Systemverhaltens, Saarbrücken, Inst. für Wirtschaftsinformatik 1995.

KUBICEK 1977

KUBICEK, H.: HEURISTISCHE BEZUGSRAHMEN UND HEURISTISCH ANGELEGTE FORSCHUNGSDESIGNS ALS ELEMENT EINER KONSTRUKTIONSSTRATEGIE EMPIRISCHER FORSCHUNG. IN: KÖHLER, R. (HRSG.): EMPIRISCHE UND HANDLUNGSTHEORETISCHE FORSCHUNGSKONZEPTIONEN IN DER BETRIEBSWIRTSCHAFTSLEHRE. BERICHT ÜBER DIE TAGUNG IN AACHEN, MÄRZ 1976. STUTTGART: POESCHEL 1977, S. 3-36. ISBN: 3-791-00214-7

KUDLICH 2000

Kudlich, Thomas, Optimierung von Materialflusssystemen mit Hilfe der Ablaufsimulation, München 2000.

KUHN 1995

Kuhn, Udo, Eine praxisnahe einstellregel für PID-Regler: Die t-summen-regel in Automatisierungstechnische Praxis 1995.

KUHN 1995

Kuhn, Axel, Prozeßketten in der Logistik, Dortmund, Verl. Praxiswissen, 978-3-929-44349-3 1995.

KUYUMCU 2013

Kuyumcu, Arif, Modellierung der Termintreue in der Produktion, 10.15480/882.1126 2013.

LANGMANN und ROJAS-PENA 2016

Langmann, Reinhard & Rojas-Pena, Leandro F., A PLC as an Industry 4.0 com-

ponent in Proceedings of 2016 13th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV). Madrid 2016, 10.1109/REV.2016.7444433.

LANZA ET AL. 2015

Lanza, Gisela; Haefner, Benjamin; Kraemer, Alexandra, Optimization of selective assembly and adaptive manufacturing by means of cyber-physical system based matching in CIRP Annals 1, 10.1016/j.cirp.2015.04.123 2015.

LAPERRIÈRE und REINHART 2014

Laperrière, Luc & Reinhart, Gunther, CIRP Encyclopedia of Production Engineering, Berlin [u.a.], Springer, 978-3-642-20616-0 2014.

LATZEL 1993

Latzel, Wolfgang, Übersichtsaufsatz: Einstellregeln für vorgegebene Überschwingweiten/ Setting rules for prescribed overshoot in at – Automatisierungstechnik, 10.1515/auto-1993-0403 1993.

LEE und LEE 2008

Lee, E. A. & Lee, Edward A., Cyber Physical Systems: Design Challenges // Proceedings, Los Alamitos, Calif., IEEE Computer Society, 978-0-7695-3132-8, 10.1109/ISORC.2008.25 2008.

LEE und SESHIA 2015

Lee, Edward Ashford & Seshia, Sanjit Arunkumar, Introduction to embedded systems, 2. ed., Printing 2.0, Lulu, LeeSeshia.org, 978-1-312-42740-2 2015.

LEFEBER ET AL. 2004

Lefeber, E.; van den Berg, R. A.; Rooda, J. E., Modeling, validation and control of manufacturing systems in Proceedings of the 2004 American Control Conference ACC. Boston, MA, USA 2004, 10.23919/ACC.2004.1384033.

LEITÃO 2009

Leitão, Paulo, Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey in Engineering Applications of Artificial Intelligence 7, 10.1016/j.engappai.2008.09.005 2009.

LEWANDOWSKI ET AL. 2013

Lewandowski, M.; Werthmann, D.; Gath, M.; Lawo, M., Agent-based Control for Material Handling Systems in In-House Logistics in European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies 2013.

VDI 1992 – Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung"

LINDEMANN 2007

Lindemann, Udo, Methodische Entwicklung technischer Produkte, 2., bearbeitete Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 978-3-540-37435-0, 10.1007/978-3-540-37451-0 2007.

LÖDDING 2001

Lödding, Hermann, Dezentrale bestandsorientierte Fertigungsregelung, Als Ms. gedr, Düsseldorf, VDI-Verl., 3-183-58702-5 2001.

LÖDDING 2016

Lödding, Hermann, Verfahren der Fertigungssteuerung, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-662-48458-6, 10.1007/978-3-662-48459-3 2016.

LÖDDING ET AL. 2019

Lödding, Hermann; Mundt, Christopher; Winter, Michael; Heuer, Tammo; Huebner, Marco; Seitz, Melissa; Schmidhuber, Matthias; Maibaum, Judith; Bank, Lukas; Roth, Stefan; Scherwitz, Philipp; Theumer, Philipp, PPS-Report 2019 Studienergebnisse, 1, Hannover, PZA Verlag, ISBN: 978-3-959-00402-2 2019.

LOTTER und WIENDAHL 2012

Lotter, Bruno & Wiendahl, Hans-Peter, Montage in der industriellen Produktion, 2. Aufl, Berlin, Springer Vieweg, 978-3-642-29060-2 2012.

LUCKE ET AL. 2015

Lucke, Dominik; Defranceski, Marcus; Adolf, Thomas, Cyberphysische Systeme für die prädiktive Instandhaltung in Handbuch Industrie 4.0, 10.1007/978-3-662-45537-1_28-1 2015.

LUCKHAM und SCHULTE 2008

Luckham, David & Schulte, Roy, Event Processing Glossary - Version 1.1 2008.

LUDWIG und NYHUIS 1992

Ludwig, E. & Nyhuis, P., Verbesserung der Termineinhaltung in komplexen Fertigungsbereichen durch einen neuen Ansatz zur Plan-Durchlaufzeit-Ermittlung in Information als Produktionsfaktor, 10.1007/978-3-642-77810-0_43 1992.

LUNZE 2003

Lunze, Jan, Automatisierungstechnik, München, Oldenbourg, 3-486-27430-9 2003.

LUNZE 2014

Lunze, Jan, Regelungstechnik, 10., aktualisierte Aufl, Berlin, Springer Vieweg, 978-3-642-53908-4, 10.1007/978-3-642-53909-1 2014.

LUTZ und WENDT 2005

Lutz, Holger & Wendt, Wolfgang, Taschenbuch der Regelungstechnik, 6., erw. Aufl, Frankfurt am Main, Deutsch, 978-3-817-11749-9 2005.

FARZANEH und KNOLL 2017

M. H. Farzaneh & A. Knoll, Time-sensitive networking (TSN): An experimental setup in 2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC) 2017, 10.1109/VNC.2017.8275648.

WEYRICH und EBERT 2016

M. Weyrich & C. Ebert, Reference Architectures for the Internet of Things in IEEE Software 1, 10.1109/MS.2016.20 2016.

MAKAROV 1994

Makarov, Anatoli, Einführung in die digitale Regelung in Regelungstechnik und Simulation, 10.1007/978-3-322-83997-8_7 1994.

MANTRAVADI und MØLLER 2019

Mantravadi, Soujanya & Møller, Charles, An Overview of Next-generation Manufacturing Execution Systems: How important is MES for Industry 4.0? in Procedia Manufacturing, 10.1016/j.promfg.2019.02.083 2019.

MARTIN 1998

Martin, Clemens, Produktionsregelung-- ein modularer, modellbasierter Ansatz, Berlin, New York, Springer, 3-540-64401-6 1998.

MARTIN 2016

Martin, Heinrich, Grundlagen Lager- und Kommissionierlogistik in Transport- und Lagerlogistik, 10.1007/978-3-658-14552-1_9 2016.

MEINHOLZ und FÖRTSCH 2019

Meinholz, Heinz & Förtsch, Gabi, Führungskraft Ingenieur, 2. Auflage, Wiesbaden, [Heidelberg], Springer Vieweg, 978-3-658-23905-3 2019.

MEISSNER 2009

Meissner, Sebastian, Logistische Stabilität in der automobilen Variantenfließfertigung, Garching b. München, Technische Universität München, 978-3-981-18199-9 2009.

MERSCH ET AL. 2017

Mersch, Henning; Aro, Jouni; Tahvanainen, Heikki; Pagnozzi, Daniel; Usländer, Thomas; Pfrommer, Julius; Henßen, Robert; Scandelli, Nadia; Bajorat, Jan; Dix, Reinhold; Gössling, Andreas; Plank, Martin; Sauer, Olaf; Iatrou, Chris Paul; Masa, Mirco; Finster, Sören; Urbas, Leon; Steinkrauss, Uwe; Berger, Christoph; Haas, Christian; Hoppe, Stefan; Traynor, John; Münch, Chris; Damm, Matthias,

Praxishandbuch OPC UA, 1. Auflage, Würzburg, Vogel Business Media, 3834334138 2017.

MICHAEL BRÄUNINGER ET AL. 2012

Michael Bräuninger; Justus Haucap; Katharina Stepping; Torben Stühmeier, Cloud Computing als Instrument für effiziente IT-Lösungen, Hamburg, Hamburgisches WeltWirtschaftsInstitut (HWWI) 2012.

MICHELS und GREINERT 2012

Michels, Jochen K. & Greinert, Timo, Cloud Computing - Wirtschaftlichkeit und Nutzen in Controlling 6, 10.15358/0935-0381-2012-6-311 2012.

MIKHAILOV ET AL. 2005

Mikhailov, Alexander S.; Armbruster, Dieter; Kaneko, Kunihiko, Networks of interacting machines, Singapore, Hackensack, N.J, World Scientific Pub. Co, 978-9-812-56498-6 2005.

MIKUT 1999

Mikut, Ralf, Modellgestützte on-line-Stabilitätsüberwachung komplexer Systeme auf der Basis unscharfer Ljapunov-Funktionen, Düsseldorf, VDI-Verl., 3-183-75708-7 1999.

MÖHRING ET AL. 2017

Möhring, Michael; Keller, Barbara; Schmidt, Rainer, Cloud-Computing in CRM IN DER PUBLIC CLOUD, 10.1007/978-3-658-19724-7_3 2017.

MOLL ET AL. 2004

Moll, Karl-Rudolf; Broy, Manfred; Pizka, Markus; Seifert, Tilman; Bergner, Klaus; Rausch, Andreas, Erfolgreiches Management von Software-Projekten in Informatik-Spektrum 5, 10.1007/s00287-004-0412-y 2004.

MÖNCH 2006

Mönch, Lars, Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme, DUV Deutscher Universitäts-Verlag, 3-8350-0249-X 2006.

MONOSTORI ET AL. 2006

Monostori, L.; Váncza, J.; Kumara, S.R.T., Agent-Based Systems for Manufacturing in CIRP Annals - Manufacturing Technology, 10.1016/j.cirp.2006.10.004 2006.

MONOSTORI ET AL. 2006

Monostori, L.; Váncza, J.; Kis, T.; Kádár, B.; Viharos, Zs.J., REAL-TIME, CO-OPERATIVE ENTERPRISES in IFAC Proceedings Volumes, 10.3182/20060517-3-FR-2903.00303 2006.

MONOSTORI ET AL. 2007

Monostori, L.; Kádár, B.; Pfeiffer, A.; Karnok, D., Solution Approaches to Real-time Control of Customized Mass Production in CIRP Annals 1, 10.1016/j.cirp.2007.05.103 2007.

MONOSTORI 2014

Monostori, László, Cyber-physical Production Systems: Roots, Expectations and R&D Challenges in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2014.03.115 2014.

MONOSTORI ET AL. 2016

Monostori, L.; Kádár, B.; Bauernhansl, T.; Kondoh, S.; Kumara, S.; Reinhart, G.; Sauer, O.; Schuh, G.; Sihn, W.; Ueda, K., Cyber-physical systems in manufacturing in CIRP Annals - Manufacturing Technology 2, 10.1016/j.cirp.2016.06.005 2016.

MOREL ET AL. 2008

Morel, J.-M.; Takens, F.; Teissier, B.; Agrachev, Andrei A.; Morse, A. Stephen; Sontag, Eduardo D.; Sussmann, Héctor J.; Utkin, Vadim I.; Nistri, Paolo; Stefani, Gianna, Nonlinear and Optimal Control Theory, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-540-77644-4, 10.1007/978-3-540-77653-6 2008.

MÖBMER 1999

Mößmer, Helmut E., Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme, München, Utz, 978-3-896-75585-8 1999.

MÜNNICH und ZWICK 2016

Münnich, Ralf Thomas & Zwick, Markus, Big Data und was nun? Neue Datenbestände und ihre Auswirkungen in AStA Wirtsch Sozialstat Arch, 10.1007/s11943-016-0196-y 2016.

MÜNZBERG ET AL. 2012

Münzberg, Ben; Schmidt, Matthias; Beck, Sebastian; Nyhuis, Peter, Model based logistic monitoring for supply and assembly processes in Production Engineering 4-5, 10.1007/s11740-012-0403-9 2012.

MÜNZBERG und NYHUIS 2009

Münzberg, Ben & Nyhuis, Peter, Individual configuration of production control to suit requirements 2009.

NIEHUES 2016

Niehues, Michael Richard, Adaptive Produktionssteuerung für Werkstattfertigungssysteme durch fertigungsbegleitende Reihenfolgebildung 2016.

NIEMANN und WESTKÄMPER 2017

Niemann, Jörg & Westkämper, Engelbert, Digitale Produktion – Herausforderung und Nutzen in Neue Entwicklungen in der Unternehmensorganisation, 10.1007/978-3-662-55426-5_42 2017.

NOACK 2001

Noack, Jörg, Zustandsmodellierung in Techniken der objektorientierten Softwareentwicklung, 10.1007/978-3-642-59481-6_7 2001.

NYHUIS 2008

Nyhuis, Peter, Beiträge zu einer Theorie der Logistik, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-540-75642-2 2008.

NYHUIS 2008

Nyhuis, Peter, Beiträge zu einer Theorie der Logistik, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 978-3-540-75642-2 2008.

NYHUIS ET AL. 2009

Nyhuis, Peter; Münzberg, Ben; Kennemann, Marco, Configuration and regulation of PPC in Production Engineering 3, 10.1007/s11740-009-0162-4 2009.

NYHUIS ET AL. 2009

Nyhuis, P.; Hartmann, W.; Kennemann, M.; Münzberg, B., Produktionsregelung mit logistischen Kennlinien in wt–Werkstattstechnik 99.4 2009.

NYHUIS ET AL. 2010

Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A., Wandlungsfähige Produktionssysteme, Berlin, GITO-Verl., 978-3-942183-15-4 2010.

NYHUIS ET AL. 2016

Nyhuis, Peter; Berger, Christoph; Pielmeier, Julia; Mayer, Jonas; Engehausen, Friederike, Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen, PZA Verlag, 978-3-959-00104-5 2016.

NYHUIS und WIENDAHL 2009

Nyhuis, Peter & Wiendahl, Hans-Peter, Fundamentals of production logistics, Berlin, London, Springer, 978-3-540-34211-3 2009.

NYHUIS und WIENDAHL 2012

Nyhuis, Peter & Wiendahl, Hans-Peter, Logistische Kennlinien, 3. Aufl. 2012, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-540-92839-3 2012.

OESTERLE ET AL. 2010

Oesterle, M.; Paulus, Th.; Emde, C., Intelligente Sensoren schaffen Transparenz

im Betrieb von Kreiselpumpen und ermöglichen somit die Steigerung von Anlagenverfügbarkeit und Energieeffizienz 2010.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, Martin, System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage, München, Utz, 978-3-8316-4206-9 2012.

OSTGATHE und ZAEH 2013

Ostgathe, Martin & Zaeh, Michael F., System for product-based control of production processes in 2013 IEEE Workshop on Computational Intelligence in Production and Logistics Systems (CIPLS). Singapore, Singapore 2013, 10.1109/CIPLS.2013.6595211.

PAGE und LIEBERT 1991

Page, Bernd & Liebert, Hansjörg, Diskrete Simulation, Berlin, Springer, 3-540-54421-6 1991.

PEREZ ET AL. 2015

Perez, Federico; Irisarri, Edurne; Orive, Dario; Marcos, Marga; Estevez, Elisabet, A CPPS Architecture approach for Industry 4.0 2015.

PERMIN 2016

Permin, Eike, Funktionszuverlässigkeit technischer selbstoptimierender Systeme zur Regelung von Produktionsprozessen, 1. Auflage, 9783863594343 2016.

PERMIN ET AL. 2016

Permin, Eike; Bertelsmeier, Felix; Blum, Matthias; Bützler, Jennifer; Haag, Sebastian; Kuz, Sinem; Özdemir, Denis; Stemmler, Sebastian; Thombansen, Ulrich; Schmitt, Robert; Brecher, Christian; Schlick, Christopher; Abel, Dirk; Poprawe, Reinhart; Loosen, Peter; Schulz, Wolfgang; Schuh, Günther, Self-optimizing Production Systems in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2015.12.114 2016.

PETERMANN 1996

Petermann, Dirk, Modellbasierte Produktionsregelung, Als Ms. gedr, Dusseldorf, VDI-Verlag, 978-31-83193-202 1996.

PICARD 2015

Picard, André Charles Roger, Integriertes Werkstückinformationsmodell zur Ausprägung werkstückindividueller Fertigungszustände, Darmstadt, 9783844040425 2015.

PIELMEIER ET AL. 2017

Pielmeier, Julia; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, Modeling Approach

for Situational Event-handling within Production Planning and Control Based on Complex Event Processing in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2017.03.158 2017.

PIELMEIER ET AL. 2018

Pielmeier, Julia; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, Approach for Defining Rules in the Context of Complex Event Processing in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2017.12.167 2018.

PIELMEIER ET AL. 2018

Pielmeier, Julia; Theumer, Philipp; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, Development of a methodology for event-based production control in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2018.03.170 2018.

PIELMEIER 2019

Pielmeier, Julia, System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung 2019.

PILLER 2006

Piller, Frank T., Mass Customization, Wiesbaden, Dt. Univ.-Verl, 978-3-8350-0355-2 2006.

PILLER ET AL. 2017

Piller, Frank; Möslein, Kathrin; Ihl, Christoph; Reichwald, Ralf, IWS in Produktion und Vertrieb: Mass Customization in Interaktive Wertschöpfung kompakt, 10.1007/978-3-658-17514-6_5 2017.

PIONTEK 2020

Piontek, Andreas, Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf, 10.15480/882.3175 2020.

PIONTEK 2020

Piontek, Andreas, Modellierung der Termintreue im Auftragsdurchlauf, 10.15480/882.3175 2020.

PISTORIUS 2020

Pistorius, Johannes, Industrie 4. 0 - Schlüsseltechnologien Für Die Produktion, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin / Heidelberg, 9783662615805 2020.

PISTORIUS 2020

Pistorius, Johannes, Industrie 4.0 – Schlüsseltechnologien für die Produktion, Berlin, Heidelberg, Springer Vieweg, 978-3-662-61580-5, 10.1007/978-3-662-61580-5 2020.

Plattform Industrie 4.0 2016

Plattform Industrie 4.0, Struktur der Verwaltungsschal–Fortentwicklung des Referenzmodells für die Industrie 4.0-Komponente 2016.

PRITSCHOW ET AL. 2003

Pritschow, Günter; Klemm, peter; Brinzer, Boris; Priese, Jörg, Produktionsregelung und Prozessplanung für die variantenreiche Serienproduktion in Marktchance Individualisierung 2003.

PRITSCHOW und BRINZER 2002

Pritschow, Günter & Brinzer, Boris, Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung in ZWF 12, 10.3139/104.100598 2002.

PUENTE LEÓN und KIENCKE 2013

Puente León, Fernando & Kiencke, Uwe, Ereignisdiskrete Systeme, 3., vollst. überarb. und erg. Aufl., München, Oldenbourg, 978-3-486-73574-1, 10.1524/9783486769715 2013.

RAFFÉE und ABEL 1979

Raffée, Hans & Abel, Bodo, Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Wirtschaftswissenschaften, München, Vahlen, 3-800-60772-7 1979.

REFA 1991

REFA, Methodenlehre der Planung und Steuerung Teile 1, 2 und 3, 4, München, Carl Hanser, 978-3446118782 1991.

REINHART ET AL. 2013

Reinhart, Gunther; Wahlster, Wolfgang; Scholz-Reiter, Bernd; Thoben, Ing. Klaus-Dieter; Engelhardt, Philipp, Cyber-Physische Produktionssysteme in wt Werkstattstechnik online 2 2013.

REINHART ET AL. 2015

Reinhart, Gunther; Wittenstein, Manfred; Scholz-Reiter, Bernd; Wahlster, Wolfgang; Zühlke, Detlef, Intelligente Vernetzung in der Fabrik, Stuttgart, Fraunhofer Verlag, 3-839-60930-5 2015.

REINHART 2017

Reinhart, Gunther, Handbuch Industrie 4.0, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 978-3-446-44642-7 2017.

REINHEIMER 2017

Reinheimer, Stefan, Industrie 4.0, Wiesbaden, Springer Vieweg, 978-3-658-18165-9 2017.

ROPKE ET AL. 2016

Ropke, Hannes; Hell, Kristofer; Zawisza, Jacek; Luder, Arndt; Schmidt, Nicole, Identification of “Industrie 4.0” component hierarchy layers in 2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Berlin, Germany 2016, 10.1109/ETFA.2016.7733752.

RÖSCH 2021

Rösch, Martin, System zur energieorientierten und kostenbasierten Produktionssteuerung mittels Reinforcement Learning 2021.

RUSHTON ET AL. 2014

Rushton, Alan; Croucher, Phil; Baker, Peter, The Handbook of Logistics and Distribution Management, 5th ed., London, Kogan Page, 978-0-749-46628-2 2014.

SAUER 2004

Sauer, Jürgen, Intelligente Ablaufplanung in lokalen und verteilten Anwendungsszenarien, Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 978-3-322-80076-3, 10.1007/978-3-322-80076-3 2004.

SCHEER 1995

Scheer, August-Wilhelm, Wirtschaftsinformatik. Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse, Studienausg, Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Budapest, Hongkong, London, Mailand, Paris, Santa Clara, Singapur, Tokio, Springer, 978-3-540-60046-6, 10.1007/978-3-662-10962-5 1995.

SCHEER 1998

Scheer, August-Wilhelm, ARIS - Vom Geschäftsprozeß zum Anwendungssystem, Dritte, völlig neubearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-642-97819-7, 10.1007/978-3-642-97819-7 1998.

SCHLEIPEN 2013

Schleipen, Miriam, Adaptivität und semantische Interoperabilität von Manufacturing Execution Systemen (MES), Karlsruhe, KIT Scientific Publishing, 3-866-44955-0 2013.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2006

Scholz-Reiter, Bernd; Rekersbrink, Henning; Freitag, Michael, Kooperierende routingprotokolle zur selbststeuerung von transportprozessen in Industrie Management 2006.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2014

Scholz-Reiter, Bernd; Harjes, Florian; Rippel, Daniel, Von der Selbststeuerung

zu cyber-physischen Systemen in Enterprise -Integration, 10.1007/978-3-642-41891-4_6 2014.

SCHOLZ-REITER und FREITAG 2007

Scholz-Reiter, B. & Freitag, M., Autonomous Processes in Assembly Systems in CIRP Annals - Manufacturing Technology 2, 10.1016/j.cirp.2007.10.002 2007.

SCHRÖDER 2015

Schröder, Dirk, Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen, 4. Aufl. 2015, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-642-30096-7 2015.

SCHUH ET AL. 2007

Schuh, G.; Gottschalk, S.; Höhne, T., High resolution production management in CIRP Annals-Manufacturing Technology 1 2007.

SCHUH ET AL. 2008

Schuh, Günther; Stich, Volker; Schmidt, Carsten, Produktionsplanung und -steuerung in Logistiknetzwerken in Beiträge zu einer Theorie der Logistik, 10.1007/978-3-540-75642-2_12 2008.

SCHUH 2011

Schuh, Günther, Strategie und Management produzierender Unternehmen, 2., vollst. neu bearb. und erw. Auflage, Berlin, Springer, 978-3-642-14502-5 2011.

SCHUH ET AL. 2013

Schuh, Günther; Potente, Till; Hauptvogel, Anika, Cyber-physische Feinplanung in wt Werkstattstechnik online 4 2013.

SCHUH ET AL. 2014

Schuh, Günther; Potente, Till; Hauptvogel, Annika, Methodology for the Evaluation of Forecast Reliability of Production Planning Systems in Factories of the Future in the digital environment - Proceedings of the 49th CIRP Conference on Manufacturing Systems, 10.1016/j.procir.2014.01.069 2014.

SCHUH ET AL. 2014

Schuh, Günther; Potente, Till; Thomas, Christina; Hempel, Thomas, Short-term Cyber-physical Production Management in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2014.10.024 2014.

SCHUH 2015

Schuh, Günther, Prosense- hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik, 1. Aufl., Aachen, Apprimus, 3-863-59346-4 2015.

SCHUH und STICH 2012

Schuh, Günther & Stich, Volker, Produktionsplanung und -steuerung 1, 4., überarbeitete Aufl, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg; Springer Vieweg, 978-3-642-25422-2, 10.1007/978-3-642-25423-9 2012.

SCHULZ 2018

Schulz, Cedric, System zur energieorientierten Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung, 10.1515/9783486785241-toc 2018.

SEITER 2016

Seiter, Mischa, Industrielle Dienstleistungen, 2., akt. und erw. Aufl. 2016, Wiesbaden, Springer Fachmedien Wiesbaden; Imprint: Springer Gabler, 978-3-658-09459-1 2016.

SEITZ ET AL. 2019

Seitz, Melissa; Mütze, Alexander; Nyhuis, Peter, Produktionssteuerung von komplexen Materialflüssen in ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 12, 10.3139/104.112211 2019.

SIHN ET AL. 2016

Sihn, Wilfried; Sunk, Alexander; Nemeth, Tanja; Kuhlang, Peter; Matyas, Kurt, Produktion und Qualität, Hanser Verlag, 978-3-446-44991-6, 10.3139/9783446449916 2016.

SIMON 1995

Simon, Dieter, Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-662-07197-7 1995.

SONTAG 1998

Sontag, Eduardo D., Mathematical Control Theory, Second Edition, New York, NY, s.l., Springer New York, 978-1-461-26825-3, 10.1007/978-1-4612-0577-7 1998.

SONTAG und WANG 1996

Sontag & Wang, New characterizations of input-to-state stability in IEEE Transactions on Automatic Control 9, 10.1109/9.536498 1996.

SORKO und IRSA 2019

Sorko, Sabrina Romina & Irsa, Wolfram, Interaktive Lehre des Ingenieursstudiums, Berlin, Springer Vieweg, 978-3-662-56224-6 2019.

STANGL ET AL. 2016

Stangl, Michael; Pielmeier, Julia; Berger, Christoph; Braunreuther, Stefan; Reinhart, Gunther, Development of a Web Based Monitoring System for a Distributed and Modern Production in Procedia CIRP 2016.

STARK ET AL. 2016

Stark, Rainer; Damerau, Thomas; Lindow, Kai, Industrie 4.0 – Digitale Neugestaltung der Produktentstehung und Produktion am Standort Berlin in Industrie 4.0 grenzenlos, 10.1007/978-3-662-48278-0_10 2016.

STARKE ET AL. 2013

Starke, G.; Kunkel, T.; Hahn, D., Flexible collaboration and control of heterogeneous mechatronic devices and systems by means of an event-driven, SOA-based automation concept in IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 10.1109/ICIT.2013.6505982 2013.

STEVEN ET AL. 2020

Steven, M.; Dörseln, J. N.; Pollmeier, I.; Schade, S.; Stetzka, R. M.; Gerhard, D.; Dümpelmann, I.; Sobotta, R.; Michalik, A.; Austerjost, M.; others, Smart Factory: Einsatzfaktoren - Technologie - Produkte, Kohlhammer Verlag, 9783170364691 2020.

STYKEL 2002

Stykel, Tatjana, Analysis and Numerical Solution of Generalized Lyapunov Equations 2002.

STYKEL 2002

Stykel, Tatjana, Stability and inertia theorems for generalized Lyapunov equations in Linear Algebra and its Applications, 10.1016/S0024-3795(02)00354-3 2002.

SURI ET AL. 2017

Suri, Kunal; Cadavid, Juan; Alferez, Mauricio; Dhouib, Saadia; Tucci-Piergiovanni, Sara, Modeling business motivation and underlying processes for RAMI 4.0-aligned cyber-physical production systems in 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Limassol 2017, 10.1109/ETFA.2017.8247702.

TANTIK und ANDERL 2018

Tantik, Erdal & Anderl, Reiner, Concept of the asset administration shell as a software-defined system in 2018 Fourth International Conference on Software Defined Systems (SDS). Barcelona 2018, 10.1109/SDS.2018.8370422.

TASCHNER 2013

Taschner, Andreas, Business Cases, Springer Fachmedien Wiesbaden, 978-3-658-00156-8 2013.

TOONEN ET AL. 2014

Toonen, C.; Lappe, D.; Scholz-Reiter, B.; Freitag, M., Kapazitätsanpassungen durch Werkzeugmaschinen in wt Werkstattstechnik online 104 2014.

TRENTESAUX 2009

Trentesaux, Damien, Distributed control of production systems in Engineering Applications of Artificial Intelligence 7, 10.1016/j.engappai.2009.05.001 2009.

ULRICH 1970

ULRICH, H.: DIE UNTERNEHMUNG ALS PRODUKTIVES SOZIALES SYSTEM: GRUNDLAGEN DER ALLGEMEINEN UNTERNEHMENSLEHRE. 2. AUFLAGE.: BERN: HAUPT 1970

UNBEHAUEN 2007

Unbehauen, Heinz, Regelungstechnik I // Klassische Verfahren zur Analyse und Synthese linearer kontinuierlicher Regelsysteme, Fuzzy-Regelsysteme, New York, Friedr. Vieweg & Sohn Verlag GWV F, 978-3-834-80230-9 2007.

UNBEHAUEN 2008

Unbehauen, Heinz, Regelungstechnik, Wiesbaden, Vieweg, 978-3-834-80497-6, 10.1007/978-3-8348-9491-5 2008.

UNGER ET AL. 2017

Unger, Hendrik; Börner, Frank; Müller, Egon, Context Related Information Provision in Industry 4.0 Environments in Procedia Manufacturing, 10.1016/j.promfg.2017.07.181 2017.

VALCKENAERS und VAN BRUSSEL 2005

Valckenaers, P. & van Brussel, H., Holonic Manufacturing Execution Systems in CIRP Annals - Manufacturing Technology 1, 10.1016/S0007-8506(07)60137-1 2005.

VALLHAGEN ET AL. 2017

Vallhagen, Johan; Almgren, Torgny; Thörnblad, Karin, Advanced use of Data as an Enabler for Adaptive Production Control using Mathematical Optimization – An Application of Industry 4.0 Principles in Procedia Manufacturing, 10.1016/j.promfg.2017.07.165 2017.

VAN BRUSSEL ET AL. 1998

van Brussel, Hendrik; Wyns, Jo; Valckenaers, Paul; Bongaerts, Luc; Peeters, Patrick, Reference architecture for holonic manufacturing systems in Computers in Industry, 10.1016/S0166-3615(98)00102-X 1998.

VDI 3633 2000

VDI 3633, Richtlinie 3633 - Blatt 1 Simulation von Logistik-, Materialflussund Produktionssystemen – Grundlagen, Berlin, Beuth 2000.

VDI 5600, Richtlinie 5600 Blatt 1 - Fertigungssysteme/Manufacturing Execution (ME) Systeme 2016.

VDMA 24582, Feldbusneutrale Referenzarchitektur für Condition Monitoring in der Fabrikautomation 2014.

VDMA 66412, Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen 2010.

VOGEL-HEUSER ET AL. 2012

Vogel-Heuser, B.; Bayrak, G.; Frank, U., Forschungsfragen in "Produktionsautomatisierung der Zukunft", Germany 2012.

VOGEL-HEUSER ET AL. 2013

Vogel-Heuser, Birgit; Diedrich, Christian; Broy, Manfred, Anforderungen an CPS aus Sicht der Automatisierungstechnik in at – Automatisierungstechnik, 10.1515/auto.2013.0061 2013.

VOGEL-HEUSER ET AL. 2015

Vogel-Heuser, Birgit; Lee, Jay; Leitão, Paulo, Agents enabling cyber-physical production systems in at-Automatisierungstechnik 2015.

VOGEL-HEUSER und ROESCH 2013

Vogel-Heuser, Birgit & Roesch, Susanne, Eine Anwendung von CPS im Bereich der Wartung in der Produktautomatisierung 2013.

VOJDANI und ZAHN 2023

Vojdani, Nina & Zahn, Axel, Agentenbasierte Transportsteuerung für Pickup & Delivery in der Produktion, Wissenschaftliche Gesellschaft für Technische Logistik, 10.2195/LJ_NOTREV_VOJDANI_DE_202301_01 2023.

VOLLING ET AL. 2013

Volling, Thomas; Matzke, Andreas; Grunewald, Martin; Spengler, Thomas S., Planning of capacities and orders in build-to-order automobile production in European Journal of Operational Research, 10.1016/j.ejor.2012.07.034 2013.

WALTER 2000

Walter, Wolfgang, Gewöhnliche Differentialgleichungen, Siebente, neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer, 978-3-540-67642-3, 10.1007/978-3-642-57240-1 2000.

WANG 2013

Wang, Lihui, Machine availability monitoring and machining process planning towards Cloud manufacturing in CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 4, 10.1016/j.cirpj.2013.07.001 2013.

WANG ET AL. 2018

Wang, Feifan; Lu, Yan; Ju, Feng, Condition-based Real-time Production Control for Smart Manufacturing Systems in 2018 IEEE 14th International Conference, 10.1109/COASE.2018.8560389 2018.

WARNECKE 1991

Warnecke, Günter, Expertensysteme in CIM, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-540-53248-4, 10.1007/978-3-642-95632-4 1991.

WARNECKE 1991

Warnecke, Günter, Expertensysteme in der Produktionstechnik in Expertensysteme in CIM 1991.

WARNECKE 1991

Warnecke, Hans-Jürgen, Produktionssicherung, München, gfmt, Ges. für Management und Technologie u.a, 3-894-15026-2 1991.

WEBER ET AL. 2018

Weber, Christian; Wieland, Matthias; Reimann, Peter, Konzepte zur Datenverarbeitung in Referenzarchitekturen für Industrie 4.0, 1610-1995, 10.1007/s13222-018-0275-z 2018.

WEHBERG 2017

Wehberg, Götz, Big Data – Mustererkennung als Erfolgsfaktor der Logistik 4.0 in Handbuch Industrie 4.0 Bd.3, 10.1007/978-3-662-53251-5_92 2017.

WEIGELT 1994

Weigelt, Max, Dezentrale Produktionssteuerung mit Agenten-Systemen, Gabler Edition Wissenschaft, Wiesbaden, Deutscher Universitätsverlag, 978-3-663-08367-2 1994.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, Engelbert, Einführung in die Organisation der Produktion, 1. Aufl, Berlin, Springer, 3-540-26039-0 2006.

WESTKÄMPER 2009

Westkämper, Engelbert, Wandlungsfähige Produktionsunternehmen, Berlin, Springer, 978-3-540-68890-7 2009.

WESTKÄMPER und LÖFFLER 2016

Westkämper, Engelbert & Löffler, Carina, Das System Produktion unter dem Einfluss globaler Megatrends in Strategien der Produktion, 10.1007/978-3-662-48914-7_4 2016.

WESTKÄMPER und WARNECKE 2011

Westkämper, Engelbert & Warnecke, Hans-Jürgen, Einführung in die Fertigungstechnik, 8., aktualis. u. erw. Aufl., korr. Nachdr, Wiesbaden, Vieweg + Teubner, 978-3-834-80835-6, 10.1007/978-3-8348-9798-5 2011.

WIENDAHL 2008

Wiendahl, Hans-Peter, Beiträge zu einer Theorie der Logistik, Berlin, Springer, 3-540-75641-8 2008.

WIENDAHL 2012

Wiendahl, Hans-Hermann, Auftragsmanagement der industriellen Produktion, 2011, Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 978-3-642-19148-0 2012.

WIENDAHL 2014

Wiendahl, Hans-Peter, Betriebsorganisation für Ingenieure, München, Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 978-3-446-44053-1, 10.3139/9783446441019 2014.

WIENDAHL und BREITHAUPT 1999

Wiendahl, Hans-Peter & Breithaupt, Jan-Wilhelm, Modelling and controlling the dynamics of production systems in Production Planning & Control 4, 10.1080/095372899233136 1999.

WIENDAHL und BREITHAUPT 2000

Wiendahl, Hans-Peter & Breithaupt, Jan-Wilhelm, Automatic production control applying control theory in International Journal of Production Economics 1, 10.1016/S0925-5273(98)00253-9 2000.

WILLNER ET AL. 2017

Willner, Alexander; Diedrich, Christian; Ben Younes, Raed; Hohmann, Stephan; Kraft, Andreas, Semantic communication between components for smart factories based on oneM2M in 2017 22nd IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation. Limassol 2017, 10.1109/ETFA.2017.8247690.

WINDELBAND und SPÖTTL 2019

Windelband, Lars & Spöttl, Georg, Industrie 4.0, 2., überarbeitete Auflage, Bielefeld, wbv, 9783763960705 2019.

WINDT und HÜLSMANN 2007

Windt, Katja & Hülsmann, Michael, Understanding autonomous cooperation and control in logistics, Berlin, New York, Springer, 978-3-540-47449-4 2007.

WOLF 1987

Wolf, Johannes, Industriebetriebliche Energienutzung und Produktionsplanung, Physica-Verlag, 978-3-790-80371-6 1987.

YU 2001

Yu, Kwok-Wai, Terminkennlinie, Düsseldorf, VDI-Verlag, 3-183-57602-3 2001.

ZABCZYK 2008

Zabczyk, Jerzy, Mathematical Control Theory, Boston, Mass., Basel, Berlin, Heidelberg, Birkhäuser; Springer, 9780817647322, 10.1007/978-0-8176-4733-9 2008.

ZACHER und REUTER 2017

Zacher, Serge & Reuter, Manfred, Regelungstechnik für Ingenieure, 15., korrigierte Auflage, Wiesbaden, Springer Vieweg, 9783658176310 2017.

ZAPP 2014

Zapp, Matthias, Semantische Wiki-Systeme in der wandlungsfähigen Produktion, Fraunhofer-Verl., 3-839-60678-0 2014.

ZEIGLER 1984

Zeigler, Bernard P., Multifaceted modelling and discrete event simulation, London, Acad. Pr, 0-127-78450-0 1984.

ZETLMAYER 1994

Zetlmayer, Heinrich, Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion, Berlin, Springer, 3-540-58134-0 1994.

ZHAI und REINHART 2018

Zhai, Simon & Reinhart, Gunther, Predictive Maintenance als Wegbereiter für die instandhaltungsgerechte Produktionssteuerung in ZWF 5, 10.3139/104.111912 2018.

ZHANG ET AL. 2016

Zhang, Haitao; Tang, Dunbing; Huang, Tengxiao; Cai, Qixiang, Dynamic Analysis of Production Network from Perspective of Order Flows in Procedia CIRP, 10.1016/j.procir.2016.10.058 2016.

12 Anhang

12.1 Studienarbeiten

Im Rahmen meiner Promotion entstanden in den Jahren 2014 bis 2019 zahlreiche Studienarbeiten an der Technischen Universität München (TUM) und der Universität Augsburg (UA) unter meiner wesentlichen wissenschaftlichen, fachlichen und inhaltlichen Anleitung. Diese Arbeiten befassten sich mit verschiedenen Fragestellungen und Forschungsthemen, von denen einige in die vorliegende Dissertation eingeflossen sind. Im Folgenden sind die Studienarbeiten aufgeführt, deren Erkenntnisse, Inhalte und Ergebnisse teilweise in die vorliegende Arbeit integriert wurden:

- **Alexander Zipfel - Eingegangen in Abschnitt 6.3 und 6.4**
Methode zur adaptiven Berechnung der geforderten Abtastfrequenz in der ereignisbasierten Produktionsregelung von Cyber-Physischen Produktionssystemen
- **Jutta Burchards – Eingegangen in Abschnitt 6.4**
Konzeption und Entwicklung einer ereignisbasierten Produktionssteuerung für Cyber-Physische Produktionssysteme zur Steigerung der Termintreue
- **Urs Hofmann - Eingegangen in Abschnitt 7.3**
Modellierung von zustandsveränderlichen Arbeitssystemen mit regelungstechnischen Methoden
- **Alexander Fetzer - Eingegangen in Abschnitt 8.2**
Stabilitätsuntersuchungen von Arbeitssystemmodellen in der Produktionsregelung

Die Ergebnisse der Arbeiten von Herrn Hofmann, Herrn Zipfel und Herrn Fetzer wurden in gemeinsamen Veröffentlichungen publiziert. An dieser Stelle möchte ich mich auch bei allen beteiligten Studierenden für ihre Unterstützung, ihr Engagement sowie die angenehme und spannende Zusammenarbeit bedanken.

12.2 Genutzte Softwareprodukte

- *Matlab R2020b*
The MathWorks GmbH, Adalperostraße 45, 85737 Ismaning
- *Software Siemens Plant Simulation*
Siemens Industry Software GmbH, Franz-Geuer-Straße 10, 50823 Köln

12.3 Sätze zum Small-Gain-Theorem

Satz 1: Allgemeines Small-Gain-Theorem für eine Kopplung von zwei ISS-Systemen. Dazu werden zwei Systeme Σ_1 und Σ_2 mit den Zustandsgleichungen beschrieben (Grüne 2006).

$$\Sigma_i: \quad \dot{X}_i(t) = f_i(x_i(t), y_i(t), u_i(t)), \quad i = 1, 2 \quad (46)$$

wobei x_i die Zustände dieser Systeme sind, y_i die internen Eingänge und u_i die externen Eingänge. Diese Systeme seien ISS, d.h. es gebe Vergleichsfunktionen $\beta_1, \beta_2 \in \mathfrak{KL}$ und $\gamma_1^{in}, \gamma_2^{in}, \gamma_1^{ex}, \gamma_2^{ex} \in \mathfrak{R}$ und so gilt:

$$\|x_i(t)\| \leq \beta_i(\|x_i(0)\|, t) + \gamma_i^{in}(\|y_i\|_{[0,t]}) + \gamma_i^{ex}(\|u_i\|_{[0,t]}), \quad (47)$$

$$t \geq 0, i = 1, 2$$

Dann ist das System Σ , gegeben als Kopplung von Σ_1 und Σ_2 , mit der Zustandsgleichung

$$\Sigma: \begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(x_1(t), (x_2(t), (u_1(t))) \\ f_2(x_2(t), (x_2(t), (u_2(t))) \end{bmatrix} \quad (48)$$

Ebenfalls ISS, falls für die internen Zuwächse gilt:

$$\gamma_1^{in}(\gamma_2^{in}(r)) < r$$

für alle $r > 0$.

Der folgende Satz verallgemeinert die Kopplung von mehr als zwei ISS-Teilsystemen unter der Annahme, dass alle internen Zuwächse lineare Funktionen sind.

Satz 2: Small-Gain-Theorem für eine Kopplung von beliebig vielen ISS-Systemen mit linearen internen Zuwächsen (Dashkovskiy et al. 2007). Hierzu wird ein System Σ , bestehend aus n paarweise gekoppelten Teilsystemen Σ_1 bis Σ_n , mit den Zustandsgleichungen:

$$\Sigma_i : \quad \dot{x}_i(t) = f_i(x_1(t), \dots, x_n(t), u_i(t)), \quad i = 1, \dots, n. \quad (49)$$

betrachtet. Diese Systeme seien jeweils ISS mit linearen internen Zuwächsen, d.h. es gebe Vergleichsfunktionen $\beta_i \in \mathfrak{KL}$ und $\gamma_i \in \mathfrak{R}$, $i = 1, \dots, n$ sowie Konstanten $\gamma_{ij} \geq 0$ mit $\gamma_{ij} = 0$, $i, j = 1, \dots, n$, sodass gilt:

$$\|x_i(t)\| \leq \beta_i(\|x_i(0)\|, t) + \sum_{j=1}^n \gamma_{ij} \|x_j\|_{0,t} + \gamma_i (\|u_i\|_{0,t}), \quad t \geq 0, \quad (50)$$

$$i = 1, \dots, n$$

Dann ist Σ ebenfalls ISS, falls für die sogenannte Zuwachsmatrix

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \gamma_{n1} & \dots & \gamma_{nn} \end{bmatrix} \in \mathcal{R}^{n \times n} \quad (51)$$

gilt:

$$\rho(\Gamma) < 1,$$

wobei $\rho(\Gamma)$ den Spektralradius bezeichnet, d.h. den Betrag des betragsgrößten Eigenwerts von Γ .