

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik

am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Julia Nina Pielmeier

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler

Die Dissertation wurde am 28.01.2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 19.08.2019 angenommen.

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt 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 Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld 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 mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess 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. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Gunther Reinhart

Michael Zäh

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) in Augsburg und am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München sowie als Gastwissenschaftlerin am Department of Industrial Engineering der University of Stellenbosch in Südafrika.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die stets wohlwollende Förderung und die Möglichkeit zur Promotion. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler bedanke ich mich recht herzlich für die Übernahme des Koreferats und bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Johannes Fottner für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes. Herrn Prof. Dr. Corné Schutte danke ich herzlich für die Gastfreundschaft und den wertvollen Austausch während meines Auslandsaufenthaltes.

Ich bedanke mich bei allen Kolleginnen und Kollegen sowie Projektpartnern für die erfolgreiche und wertschätzende Zusammenarbeit sowie die prägende und lehrreiche Zeit, an die ich gerne zurückdenke. Mein ausdrücklicher Dank gilt Dr.-Ing. Andreas Hees, Jan Klöber-Koch, Dr.-Ing. Cedric Schultz und Dr.-Ing. Philipp Engelhardt für die wertvollen Hinweise und die gründliche Durchsicht meiner Arbeit. Außerdem danke ich Dr.-Ing. Josef Huber und Svenja Krottil für die angenehme Atmosphäre in unserem Augsburger Büro. Mieke Henning, Marisa Walters, Stephan Snyman, Christa de Kock, Zandaline Els, Marelle Terblanche, Kelliann Jones und Lukas Steenkamp danke ich für den fachlichen Austausch sowie die herzliche Gastfreundschaft in Südafrika. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Studierenden, insbesondere bei Christina Bayerl, Lukas Heinen und Philipp Theumer bedanken, die mich bei der Ausarbeitung meiner Dissertation unterstützt haben.

Mein größter Dank gilt schließlich meiner Familie, die mich auf meinem bisherigen Lebensweg immer sehr liebevoll unterstützt hat. Von Herzen danke ich meinen Eltern Anita und Franz Pielmeier für ihre großartige Unterstützung und die Gewährung aller Freiheiten, so dass ich mich stets frei entwickeln konnte. Ich danke meinen Großeltern Zenta und Franz Pielmeier für ihre Begleitung und Förderung meines Ausbildungsweges. Insbesondere danke ich meiner wundervollen Schwester Sina Pielmeier, die mein Leben so viel bunter macht mit ihrem Wesen und auf die ich, zusammen mit ihrem Freund Maximilian Fiedler, immer zählen kann. Herzlich danke ich meinem Mann Julian Pielmeier für seinen maßgeblichen Beitrag zum Gelingen der Arbeit sowie meinen Schwiegereltern Johanna und Jürgen Matysik für alle kulinarischen Highlights und das Interesse an meiner Entwicklung.

Lieber Julian, ich kann Dir nicht genug danken für Deine bedingungslose und liebevolle Unterstützung, für Dein Verständnis sowie die fortwährende Motivation während der Abitur-, Studien- und Promotionszeit. Mit Deiner ruhigen, ausgeglichenen Art und insbesondere Deiner sprachlichen Expertise hast Du entscheidend zur Qualität der schriftlichen Ausarbeitung meiner Doktorarbeit beigetragen. Ich freue mich auf unsere gemeinsame Zukunft und widme Dir diese Arbeit.

München, im Oktober 2019

Julia Nina Pielmeier

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	xi
1 Einleitung.....	1
1.1 Ausgangssituation	1
1.2 Motivation der Arbeit.....	3
1.3 Zielsetzung der Arbeit.....	5
1.4 Aufbau der Arbeit	7
2 Grundlagen.....	11
2.1 Produktionsplanung und -steuerung.....	11
2.1.1 Allgemeines	11
2.1.2 Zielgrößen der Produktionsplanung und -steuerung	12
2.1.3 Aufgaben der Produktionsplanung	14
2.1.4 Aufgaben der Produktionssteuerung	16
2.2 Informationsmanagement in der Produktion	18
2.2.1 Allgemeines	18
2.2.2 Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung	19
2.2.3 Informations- und Kommunikationstechnologien	22
2.3 Datenverarbeitung und -analyse.....	23
2.3.1 Allgemeines	23

2.3.2	Ereignisorientierte Systeme	25
2.3.3	Knowledge Discovery in Databases.....	29
2.4	Fazit.....	33
3	Stand der Technik und Forschung.....	35
3.1	Ereignisorientierte Modellierung steuerungsrelevanter Informationen... ..	35
3.1.1	Allgemeines.....	35
3.1.2	Strukturierung von Ereignisdaten	36
3.1.3	Modellierung von strukturellen Ereignisarchitekturen	38
3.1.4	Modellierung von Produktionsprozessen und Ereignisregeln	39
3.2	Ansätze zum Ereignismanagement.....	42
3.2.1	Allgemeines.....	42
3.2.2	Ereignisorientierte Architekturen.....	47
3.2.3	Ansätze zur Mustererkennung und Wissensrepräsentation	50
3.3	Ansätze zur Steuerung von Produktionsabläufen	53
3.3.1	Allgemeines.....	53
3.3.2	Adaptive Ansätze zur Produktionssteuerung	54
3.3.3	Ansätze zur Entscheidungsunterstützung.....	56
3.4	Ableitung des resultierenden Handlungsbedarfs	60
4	Anforderungen an ein System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung.....	63
4.1	Übersicht.....	63
4.2	Allgemeine Anforderungen	63
4.3	Spezifische Anforderungen.....	64

5	System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung	67
5.1	Übersicht	67
5.2	Systemelemente.....	68
6	Ereignismodellierung	71
6.1	Allgemeines.....	71
6.2	Strukturierung der Ereignisdaten	72
6.3	Modellierung von Ereignishierarchien.....	74
6.3.1	Allgemeines	74
6.3.2	Strukturelles Ereignismodell für die Produktionssteuerung.....	76
6.4	Modellierung von Produktionsprozessen und Ereignisregeln	79
6.4.1	Allgemeines	79
6.4.2	Ansatz zur Modellierung von Produktionsprozessen und Ereignisregeln.....	84
6.5	Fazit.....	85
7	Ereignisverarbeitung und -analyse	87
7.1	Allgemeines.....	87
7.2	Referenzarchitektur für eine ereignisorientierte Produktionssteuerung ..	87
7.3	Mustererkennung für die ereignisorientierte Produktionssteuerung.....	91
7.3.1	Wissensarten für die ereignisorientierte Produktionssteuerung	93
7.3.2	Vorgehen für die erfahrungsbasierte Mustererkennung	95
7.3.3	Vorgehen für die Data-Mining-basierte Mustererkennung	97
7.3.4	Definition von Eingriffsgrenzen.....	104
7.4	Fazit.....	107

8	Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung.....	109
8.1	Allgemeines	109
8.2	Ablauf der Methode	109
8.3	Maßnahmeninitiierung.....	111
8.3.1	Klassifikation der Ereignisarten.....	111
8.3.2	Klassifikation der Ereigniswirkungen	114
8.3.3	Automatisierungsgrad und Ereignisverarbeitung.....	119
8.4	Maßnahmengenerierung	120
8.4.1	Allgemeines.....	120
8.4.2	Maßnahmenportfolio.....	121
8.4.3	Operative Maßnahmen zur Anpassung der Auftragsfreigabe.....	122
8.4.4	Operative Maßnahmen zur Anpassung der Reihenfolgebildung ...	123
8.4.5	Operative Maßnahmen zur Anpassung der Kapazität.....	125
8.5	Maßnahmenpriorisierung und -auswahl	127
8.5.1	Zielgrößen und Kennzahlensystem	128
8.5.2	Unternehmensspezifische Gewichtung der Kennzahlen.....	129
8.5.3	Vorselektion der Maßnahmen mittels Ursache-Wirkungs-Matrix.	130
8.5.4	Definition der Zielfunktion	132
8.5.5	Online-Optimierung mit Look-ahead.....	135
8.6	Fazit.....	138
9	Prototypische Umsetzung und Validierung	141
9.1	Allgemeines	141
9.2	Anwendungsbeispiel.....	141

9.2.1	Anwendungsszenario.....	141
9.2.2	Produktionstechnisches System	142
9.3	Anwendung des Systems zur ereignisorientierten Produktionssteuerung	145
9.3.1	Allgemeines	145
9.3.2	Ereignismodellierung und Regelableitung	146
9.3.3	Mustererkennung und Regelableitung.....	147
9.3.4	Maßnahmenauswahl und -priorisierung.....	153
9.4	Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung.....	159
9.4.1	Beschreibung der Umsetzung.....	159
9.4.2	Aufbau der Simulationsstudie	161
9.4.3	Ergebnisse der Simulation.....	163
9.5	Technisch-wirtschaftliche Bewertung.....	166
9.5.1	Anforderungsbezogene Bewertung	166
9.5.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	168
9.6	Fazit.....	172
10	Zusammenfassung und Ausblick	173
10.1	Zusammenfassung	173
10.2	Ausblick	175
11	Literaturverzeichnis	177
12	Betreute Studienarbeiten	203

Abkürzungsverzeichnis

AFP	Automated Fiber Placement
AHP	Analytic Hierarchy Process (Analytischer Hierarchieprozess)
AI	Artificial Intelligence (Künstliche Intelligenz)
APS	Advanced Planning and Scheduling
ARIS	Architektur integrierter Informationssysteme
ARM	Association Rule Mining
ATS	Autonome Transportsysteme
Auto-ID	Automatische-Identifikations-Technologien
BDE	Betriebsdatenerfassung
BPMN	Business Process Model and Notation
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CEP	Complex Event Processing
CPPS	Cyber-Physische Produktionssysteme
CPS	Cyber-Physische Systeme
CQL	Continuous Query Languages
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DSS	Decision Support System
EDA	Event-driven Architecture
EDM	Event Diagram Model
EPA	Event Processing Agent
EPCIS	Electronic Product Code Information Services
EPK	Ereignisgesteuerte Prozessketten

Abkürzungsverzeichnis

EPL	Event Processing Language
EPN	Event Processing Network
ERP	Enterprise Resource Planning
ET AL.	et alii (und andere)
etc.	et cetera (und so weiter)
EUS	Entscheidungsunterstützungssysteme
FIFO	First In - First Out
FP	Frequent Pattern
FPE	Frühester Plan-Endtermin
FPS	Frühester Plan-Starttermin
GA	Genetischer Algorithmus
GS1	Global Standards One
GSP	Generalized Sequential Patterns
HF	hochfrequent
HMS	Holonic Manufacturing Systems
IR	Intermediate Representation
IT	Informationstechnik
IuK	Informations- und Kommunikationstechnologien
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KOZ	Kürzeste Operationszeit
LOZ	Längste Operationszeit
MAS	Multiagentensysteme
MDE	Maschiendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System
MILP	Mixed Integer Linear Programming (gemischt-ganzzahlige lineare Programmierung)

MOM	Message Oriented Middelware
MRP I	Material Requirements Planning
MRP II	Manufacturing Resource Planning
NC	Numerical Control (Numerische Steuerung)
NFC	Near Field Communication
OCL	Objekt Constraint Language
OLAP	Online Analytical Processing
OMG EMP	Objekt Management Group Event Metamodel and Profile
OPC UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PPS	Produktionsplanung und-steuerung
PSO	Partikelschwarmoptimierung
RFID	Radio-Frequency Identification
SOA	Serviceorientierte Architektur
sog.	sogenannt
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SQL	Structured Query Language
UHF	ultrahochfrequent
UML	Unified Modelling Language
UWB	Ultrawideband
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vgl.	vergleiche
WLAN	Wireless Local Area Networks
z. B.	zum Beispiel

Verzeichnis der Formelzeichen

a_t	Anfahrzeit in Periode t
b_{mt}	Messerschnitte von Messer m in Periode t
$c^{Maschine}$	Maschinenstundensatz
c^{Messer}	Kosten von einem Messerschnitt
$conf$	Konfidenz
c^{Spule}	Materialwert
D_e	Dringlichkeitswert von Ereignis e
d_e	voraussichtliche Dauer der Auswirkungen des Ereignisses
d^{Messer}	Dauer für das Wechseln des Messersatzes
d^{Spule}	Dauer für das Wechseln einer Spule
\emptyset	Durchschnitt
G^{Messer}	Grenzwert der Kapazität des Messers (spätester Tauschzeitpunkt)
G^{Spule}	Grenzwert der Kapazität der Spule (spätester Tauschzeitpunkt)
i_M	binäres Attribut
I	Menge aller Items
k_e	Kosten der betroffenen Produktionsprozesse
k_t	Stillstandszeit in Periode t
KAP^{Messer}	Kapazität eines neuen Messers (Schnittanzahl)
KAP^{Spule}	Kapazität einer neuen Spule (Länge)
K_{ij}	Mehrkosten durch Ereignis e_i in Periode p_j
$K_{ij}^{Ereignis}$	Kosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j

Verzeichnis der Formelzeichen

$K_{ij}^{FixMa\ssnahme}$	fixer Anteil der Kosten für die Maßnahme in der betrachteten Periode p_j
K_{ij}^{Log}	Logistikkosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j
K_j^{Mehr}	Mehrkosten in der betrachteten Periode p_j
$K_{ij}^{Ma\ssnahme}$	Kosten der Maßnahme von Ereignis e_i in Periode p_j
K_{ij}^{Opp}	Opportunitätskosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j
K_{ij}^{Prod}	Produktionskosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j
$K_{ij}^{VarMa\ssnahme}$	variabler Anteil der Kosten für die Maßnahme in der betrachteten Periode p_j
K_{ij}^{Verz}	Verzugskosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j
$minconf$	Mindest Konfidenz
$minsupp$	Mindest Support
n	Anzahl der Messungen
n_i^P	Anzahl der betroffenen Produktionsprozesse
n_t	Binärvariable; ist 1, falls Messer oder Spulen in Periode t gewechselt werden; ansonsten 0
o_t	Binärvariable; ist 1, falls Messerblock in Periode t gewechselt wird; ansonsten 0
p_{mt}	Restkapazität des Messers m in Periode t
q_{mt}	Nicht genutzte Messerschnitte des Messers m in Periode t
r_{st}	Restlänge der Spule s in Periode t

SW_e	Schwere von Ereignis e
S_e	Schadenswert von Ereignis e
σ	Standardabweichung
$supp$	Support
t	Zeit
$t_{Amortisation}$	Amortisationszeit
$t[k]$	einzelne Transaktion
T	Menge von Transaktionen
v_{st}	Materialverbrauch der Spule s in Periode t
w_t	Binärvariable; ist 1, falls es in Periode t einen Stillstand gibt
x	aktueller Messwert
\bar{x}	Mittelwert
x_{st}	Binärvariable; ist 1, falls Spule s in Periode t gewechselt wird; ansonsten 0
X	Itemset
y_{mt}	Binärvariable; ist 1, falls Messer m in Periode t gewechselt wird; ansonsten 0
Y	Itemset
z_{st}	Abfall der Spule s in Periode t

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Produktionsunternehmen sind den Herausforderungen einer immer dynamischer und volatiler werdenden Umwelt und zunehmenden Veränderungen des Marktes ausgesetzt (ABELE & REINHART 2011). Gesättigte Märkte führen u. a. zu einem Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt. Den individuellen Ansprüchen der Kunden wird dabei mit einer steigenden Produkt- und Variantenvielfalt begegnet (REINHART ET AL. 2013). Demzufolge werden die Losgrößen in der Produktion kleiner, im Gegenzug nimmt die Materialflusskomplexität zu (HAMANN 2008, ELMARAGHY ET AL. 2012). Zudem müssen Produkte mit gleichbleibender Qualität und gleichem Preis weiterhin den Ansprüchen der Kunden gerecht werden (REINHART ET AL. 2013). Der Innovationsdruck und die damit verbundenen kurzen Produktlebenszyklen sowie die veränderten Marktbedingungen führen zu einer hohen Komplexität in Produktions- und Logistikprozessen. Zusätzlich wird der Wettbewerbsdruck für Unternehmen durch die Globalisierung und die Öffnung der Wirtschaftsräume für Produkte aus Niedriglohnländern und die damit einhergehende Vergleichbarkeit von Angeboten immer stärker (SCHOLZ-REITER & HÖHNS 2006).

Für Unternehmen ist es in Zukunft essenziell, mit diesen dynamischen Effekten umgehen zu können, um wettbewerbsfähig zu bleiben (WINDT ET AL. 2010). Dafür werden flexible und wandlungsfähige Prozesse bei gleichzeitig hoher Produktivität in Produktion und Logistik benötigt (REINHART ET AL. 2013). Lösungen hierfür werden im Rahmen von aktuellen Forschungs- und Entwicklungsbestrebungen unter dem Begriff „Industrie 4.0“ erarbeitet (BERGER ET AL. 2015).

Eine wichtige Rolle zur Bewältigung der Herausforderungen spielen dabei die Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Zentrale Planungs- und Steuerungssysteme offenbaren jedoch Defizite im Umgang mit Komplexität und mit schnellen Reaktionen in Echtzeit auf produktionsrelevante Ereignisse (WINDT ET AL. 2010, METZ 2014). Ein Ereignis (engl. event) wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an LUCKHAM & SCHULTE (2012) als „*anything that happens, or is contemplated as happening*“ definiert. So werden beispielsweise Änderungen von Sensorwerten oder Produktionsausfälle als Ereignisse betrachtet. Die mangelnde Reaktionsfähigkeit auf Ereignisse in der Produktion bestätigen auch die Ergebnisse einer Studie mit dem Titel „Aktuellen Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen“, die gemeinsam von vier produktionstechnischen Instituten in deutschen Unternehmen durchgeführt wurde.

1 Einleitung

Insgesamt nahmen 170 Unternehmensvertreter an der Studie teil (Grundgesamtheit n=170). Insbesondere gaben 67 % der Befragten umsatzstarker Unternehmen an, dass sie ihre vorhandenen PPS-Systeme als nicht zukunftsfähig erachten (vgl. Abbildung 1). Ebenso zeigt sich anhand der Studie, dass die Termintreue für viele Unternehmen die bestimmende Zielgröße der Produktion ist und diese folglich in der PPS gegenüber anderen Größen einen höheren Stellenwert einnimmt (MAYER ET AL. 2016).

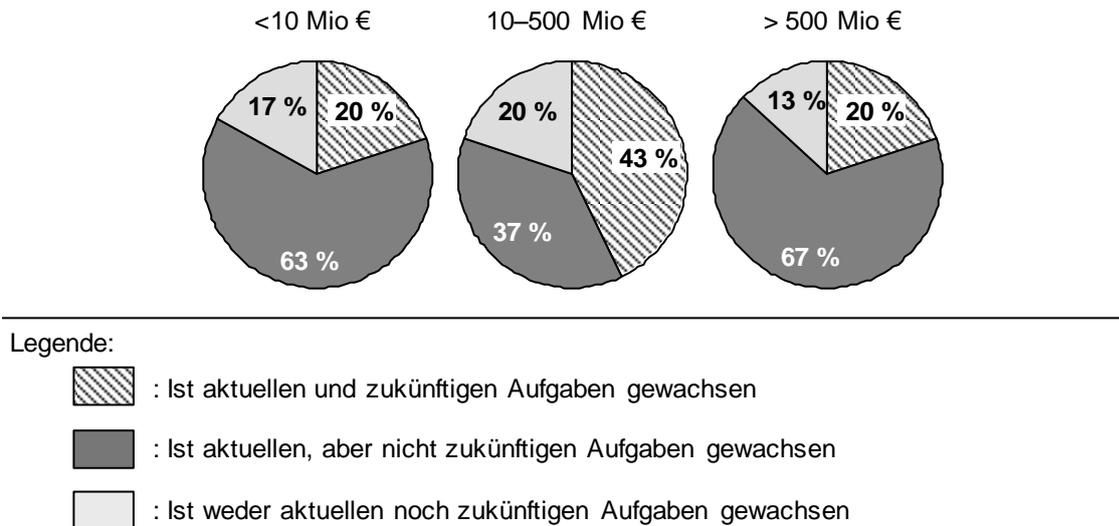


Abbildung 1: Beurteilung der Leistungsfähigkeit der PPS gegliedert nach der Umsatzstärke der Unternehmen (MAYER ET AL. 2016)

Die situationsabhängige Steuerung von Produktions- und Logistikprozessen gewinnt zunehmend an Bedeutung, um mit der steigenden Komplexität und Dynamik besser umgehen zu können. Diese Art der Steuerung soll u. a. eine Reaktion auf verschiedene Ereignisse in Echtzeit ermöglichen (GRUNDSTEIN ET AL. 2015). Die Basis für zeitgemäße Produktionssteuerungsansätze bildet die Befähigung zur echtzeitnahen Entscheidungsunterstützung und Interaktion, wodurch unter dynamischen Bedingungen eine hohe logistische Zielerreichung erwirkt werden kann. Die Bedeutung intelligenter Softwarearchitekturen zur Realisierung nimmt daher zu (METZ 2014).

Entscheidungen im Rahmen der PPS müssen in Unternehmen häufig auf Basis von unzureichenden und veralteten Informationen getroffen werden. Jedoch sollte zu jedem Zeitpunkt eine transparente Sicht auf die relevanten Produktionsprozesse und Kennzahlen durch aktuelle Informationen ermöglicht werden. Durch eine ereignisbasierte PPS kann flexibler und schneller auf Veränderungen im Produktionsprozess reagiert werden (SCHUH ET AL. 2015). Zukünftige Produktionssysteme

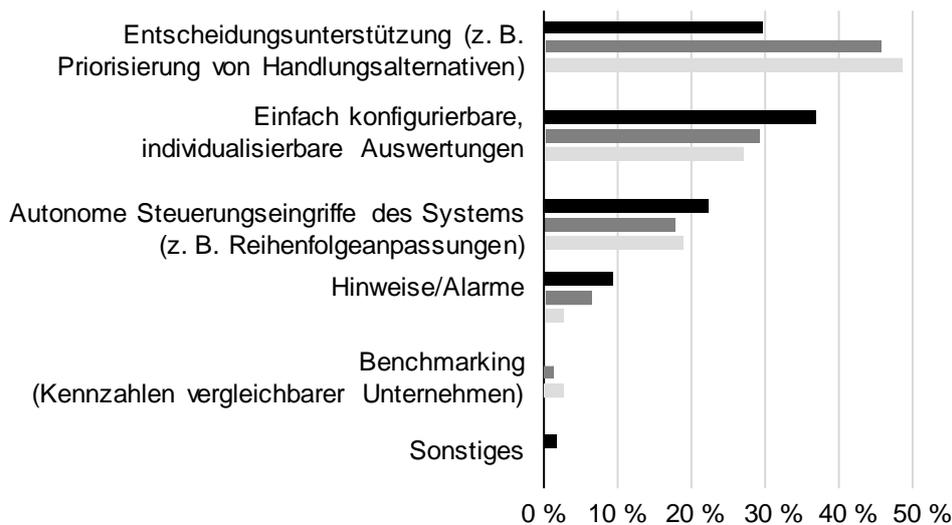
müssen in der Lage sein, sich schnell und einfach an Veränderungen hinsichtlich des Produktionsprogramms und der Abläufe anpassen zu können. Dies ist insbesondere eine zentrale Zielsetzung, um die gewünschte Wandlungsfähigkeit und Flexibilität, wie z. B. hinsichtlich Kapazitätsveränderungen, realisieren zu können. Diesen veränderten Anforderungen an die Produktionssteuerung stehen Entwicklungen aus dem Bereich des Internets der Dinge und Dienste gegenüber, die eine angemessene und zeitgemäße Produktionssteuerung ermöglichen. So ist eine zunehmende vertikale und horizontale Vernetzung in wertschöpfenden Prozessen festzustellen. Ebenso steigt die Anzahl eingesetzter Sensorik und erfasster Daten im Produktionsbereich (REINSEL ET AL. 2017). Zudem stehen neue ereignisorientierte Softwarearchitekturen und -technologien zur Verfügung, die bisher vor allem im Bereich des Bankenwesens zur Betrugserkennung oder zur Analyse von Datenströmen in sozialen Netzwerken zum Einsatz kommen (CAMERON ET AL. 2012, SPRINGER 2017). Geeignete ereignisbasierte Steuerungsarchitekturen und -strategien wurden hingegen bisher nicht ausreichend für den Einsatz in Produktionsumgebungen untersucht und hinsichtlich ihres Potenzials bewertet.

1.2 Motivation der Arbeit

Im Rahmen der oben genannten Studie zeigt sich, dass es gerade bei der Ereigniserfassung und -verarbeitung im Bereich der Produktion erheblichen Nachholbedarf in der deutschen Industrie gibt. Mit neuen Technologien zur Datenerzeugung und -verarbeitung im Produktionsprozess ergeben sich für Unternehmen neue Chancen zur Steigerung der Reaktionsfähigkeit. Informationen in Form von Ereignissen und Kennzahlen nehmen dabei eine Schlüsselrolle ein. So geben 20 % der Befragten an, dass die Datenqualität der Rückmeldungen in ihrem Unternehmen unzureichend ist und dass die Echtzeitabbildung der Abläufe in der Produktion ein wichtiger Befähiger für eine situationsgerechte Entscheidungsfindung ist (vgl. Abbildung 2). Daraus lässt sich eine mangelnde Reaktionsfähigkeit der Produktionssteuerung auf produktionsrelevante Ereignisse und der Wunsch nach Entscheidungsunterstützung auf Basis von aktuellen Rückmeldedaten ableiten (KROPP 2016, MAYER ET AL. 2016).

Ziel des Informationsmanagements in Unternehmen muss es sein, relevante Informationen zeitnah zu ermitteln und aufzubereiten, um damit die Produktionssteuerung zu verbessern. Statische Berichte, die auf der statistischen Auswertung von historischen Daten beruhen, sind nicht mehr ausreichend, um den aktuellen Herausforderung in der PPS zu begegnen.

1 Einleitung



Legende:

■ Umsatz < 10 Mio. € ■ Umsatz zwischen 10–500 Mio. € ■ Umsatz > 500 Mio. €

*Abbildung 2: Nutzungsmöglichkeiten von Rückmeldedaten für die PPS
(MAYER ET AL. 2016)*

Der Faktor Zeit spielt zunehmend eine wichtigere Rolle und kann auch Vorteile gegenüber Wettbewerbern verschaffen. Dies liegt auch darin begründet, dass der Wert einer Information und der daraus abzuleitende Erkenntnisgewinn zunehmend sinken, je länger der Auftretszeitpunkt eines Ereignisses zurückliegt. Abbildung 3 verdeutlicht diesen Zusammenhang und ordnet den Arten von Reaktionen, wie proaktiven, echtzeitnahen und späten Aktionen die entsprechenden Verarbeitungsansätze, wie z. B. *Predictive Analysis*, *Complex Event Processing (CEP)* und *Post Processing*, je Auftrettsphase zu. Ereignisorientierte Technologien, wie beispielsweise CEP, können aufgrund der Echtzeitausrichtung sowie der Fähigkeit zur Erkennung von Zusammenhängen und Mustern in Ereignisströmen dazu beitragen, die Reaktionsfähigkeit auf Ereignisse im Produktionsablauf entscheidend zu verbessern. Gleichzeitig erfordern die Randbedingungen des Markts eine zeitgemäße Produktionssteuerung und eine effiziente Entscheidungsunterstützung. Hierbei können ereignisbasierte Systeme mit neuen Möglichkeiten im Hinblick auf die Erfassung, Aufbereitung und Visualisierung von Daten innerhalb der Produktion einen wichtigen Beitrag leisten sowie für Planungs- und Steuerungsentscheidungen genutzt werden. Heutige Softwaresysteme in Produktionsumgebungen weisen insbesondere Defizite bezüglich der erforderlichen Transparenz, Durchgängigkeit und Reaktionsfähigkeit auf (SCHUH ET AL. 2016). Verantwortlich für die mangelnde Reaktionsfähigkeit sind die starke Vereinfachung komplexer Sachverhalte in Modellen sowie die mangelnde Datenqualität (WIENDAHL 2008).

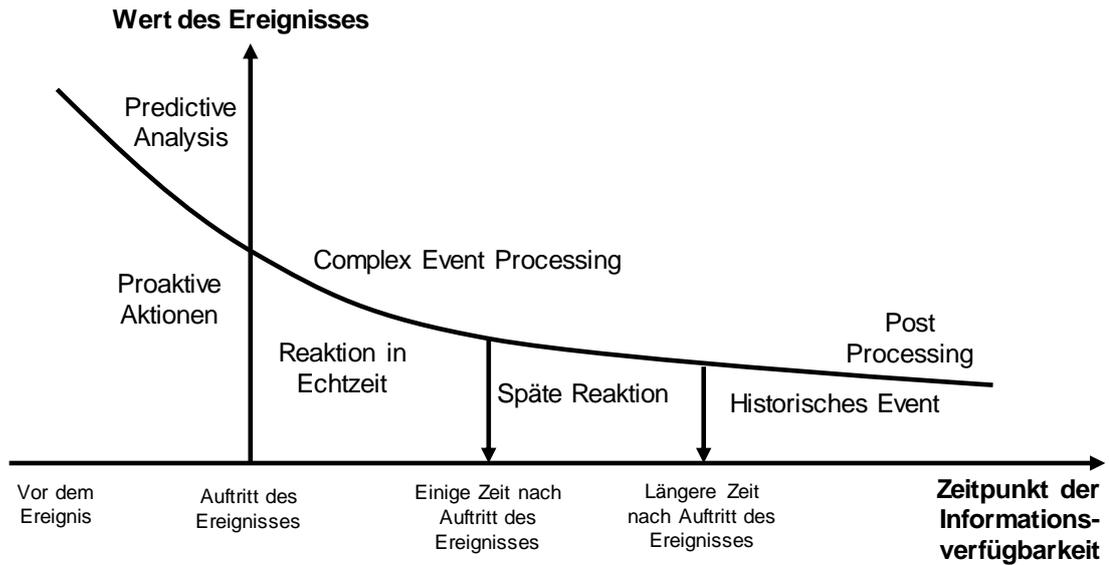


Abbildung 3: Erkenntniswert eines Ereignisses in Abhängigkeit des Faktors Zeit in Anlehnung an SPRINGER (2017)

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Das übergeordnete Ziel dieser Arbeit ist es, durch einen geeigneten Ansatz Entscheidungsprozesse in der Produktionssteuerung effizient zu unterstützen und somit zu einer Verbesserung der logistischen Zielerreichung beizutragen. Vor dem Hintergrund der aktuellen Entwicklungen im Sinne einer zunehmenden horizontalen und vertikalen Vernetzung und der steigenden Datenverfügbarkeit in der Produktion sollen Daten gesammelt und richtig interpretiert werden, um ereignisbasiert Maßnahmen auszuwählen und umzusetzen.

Bezugnehmend auf die dargelegte Motivation und zur Erreichung der Zielsetzung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung entwickelt. Das System soll einen Beitrag zur echtzeitnahen Entscheidungsunterstützung im Rahmen der Produktionssteuerung leisten. Abbildung 4 stellt die Zielsetzung sowie die sich daraus ableitenden Unterziele der vorliegenden Arbeit dar.

1 Einleitung



Abbildung 4: Zielsetzung und abgeleitete Unterziele der vorliegenden Arbeit

Das ereignisbasierte Auslösen von steuerungsrelevanten Maßnahmen führt zu einer verbesserten Erfüllung der logistischen Zielgrößen. Durch die echtzeitnahe Analyse der Ereignisse wird eine Erhöhung der Transparenz bzgl. der Abläufe und aktuellen Zustände der Produktionsprozesse ermöglicht, um darauf basierend eine Priorisierung von Maßnahmen und Reaktionen vornehmen zu können. Um die Möglichkeiten eines ereignisbasierten Systems in der Produktion nutzen und die Reaktionsfähigkeit steigern zu können, gilt es, verschiedene Herausforderungen zu analysieren und entsprechende Vorgehensweisen und Lösungsansätze zu entwickeln (vgl. PIELMEIER ET AL. 2016).

Eine zentrale Fragestellung des *Informationsmanagements* ist, welche Ereignisse für die Produktionssteuerung relevant sind und in der Produktionsumgebung zu erfassen und zu verarbeiten sind. Eine standardisierte Definition der Ereignisse in Form einer Ereignismodellierung ist Grundlage für die weitere Datenverarbeitung und die Informationsgewinnung. Darüber hinaus müssen Schnittstellen zur Informationsübertragung und der Aufbau einer Kommunikationsarchitektur festgelegt werden. Hierbei sind sowohl Echtzeitanforderungen als auch die Anforderungen an die Modellierung für die Ereignisverarbeitung zu beachten.

Im Rahmen des *Ereignismanagements* werden Ansätze zur Mustererkennung und Wissensextraktion für die ereignisorientierte Produktionssteuerung analysiert. Die Verarbeitung der Ereignisse erfolgt basierend auf Regeln, die zum Ziel haben, Muster in den Ereignisströmen zu erkennen und entsprechende Steuerungsmaßnahmen auszulösen. Mithilfe der Mustererkennung gilt es somit, unbekannte Zusammenhänge aus den Datensätzen zu extrahieren und darauf basierend Regeln für

die Ereignisverarbeitung abzuleiten. Neben expertenbasierten Ansätzen zur Mustererkennung werden dabei auch Data-Mining-basierte Ansätze zur Unterstützung der Experten in Betracht gezogen. Ergänzend dazu werden passende Grenzen für steuerungsrelevante Eingriffe unter Berücksichtigung der Auswirkungen der eintretenden Ereignisse definiert.

Schließlich gilt es, mittels der *Methode der ereignisorientierten Produktionssteuerung* mögliche Maßnahmen anwendungsfallspezifisch auszuwählen und zu priorisieren, um das übergeordnete Ziel einer echtzeitnahen Entscheidungsunterstützung bei komplexen Wahlmöglichkeiten in der Produktionssteuerung zu realisieren. Dabei spielen die Priorisierung von Kennzahlen und die Definition von Zielfunktionen eine entscheidende Rolle. Hierbei sollen auch Optimierungsansätze zum Einsatz kommen, um die Zielfunktionen zu lösen und dadurch die richtigen Maßnahmen ergreifen zu können.

1.4 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit ist dem Bereich der Ingenieurwissenschaften zuzuordnen und unterliegt damit im Rahmen der Wissenschaftssystematik den Anforderungen der Realwissenschaften. Fokus der Realwissenschaft ist die Beschreibung, Erklärung und Gestaltung empirisch wahrnehmbarer Wirklichkeitsausschnitte (ULRICH & HILL 1976A). Die Motivation des hier beschriebenen Forschungsvorhabens leitet sich aus der praxisrelevanten Fragestellung ab, wie eine höhere Reaktionsfähigkeit der Produktionssteuerung mithilfe eines ereignisorientierten Ansatzes realisiert werden kann. Das Vorhaben lässt sich somit den angewandten Handlungswissenschaften zuordnen, da im Rahmen der Arbeit das Ziel verfolgt wird einen praktischen Nutzen zu erreichen.

Das forschungsmethodische Vorgehen orientiert sich an den Strategien angewandter Forschung von ULRICH (1981), wonach sich ein Forschungsprozess durch eine praxisorientierte und -relevante Problemstellung begründet, die Erarbeitung eines entsprechenden Lösungsansatzes umfasst und mit der Validierung der entwickelten Lösung in der Praxis abgeschlossen wird.

Das operationelle Vorgehen im Rahmen des Prozesses kann dabei mit den Kategorien terminologisch-deskriptiv, empirisch-induktiv sowie analytisch-deduktiv beschrieben werden. Dabei wird unter terminologisch-deskriptive Ansätzen die Schaffung eines Begriffssystems und dessen Anwendung für die Beschreibung der Forschungsobjekte verstanden. Empirisch-induktive Aktivitäten befassen sich mit

1 Einleitung

der Erkennung von Zusammenhängen und der induktiven Ableitung von Hypothesen durch Generalisierung von Einzelbeobachtungen sowie mit deren empirischer Überprüfung. Analytisch-deduktive Aktivitäten umfassen alle logischen Schritte, die ohne zusätzliche Induktionsschlüsse auskommen und fokussieren insbesondere die deduktive Entwicklung von Modellen und Methoden sowie deren analytische Auswertung (ULRICH & HILL 1976B).

Der Aufbau der Arbeit folgt diesen Ansätzen und wird nachfolgend näher beschrieben. Um die im vorhergehenden Abschnitt erläuterte Zielstellung zu erfüllen, unterteilt sich die vorliegende Arbeit in zehn Kapitel. Abbildung 5 zeigt den strukturellen Aufbau der Arbeit.

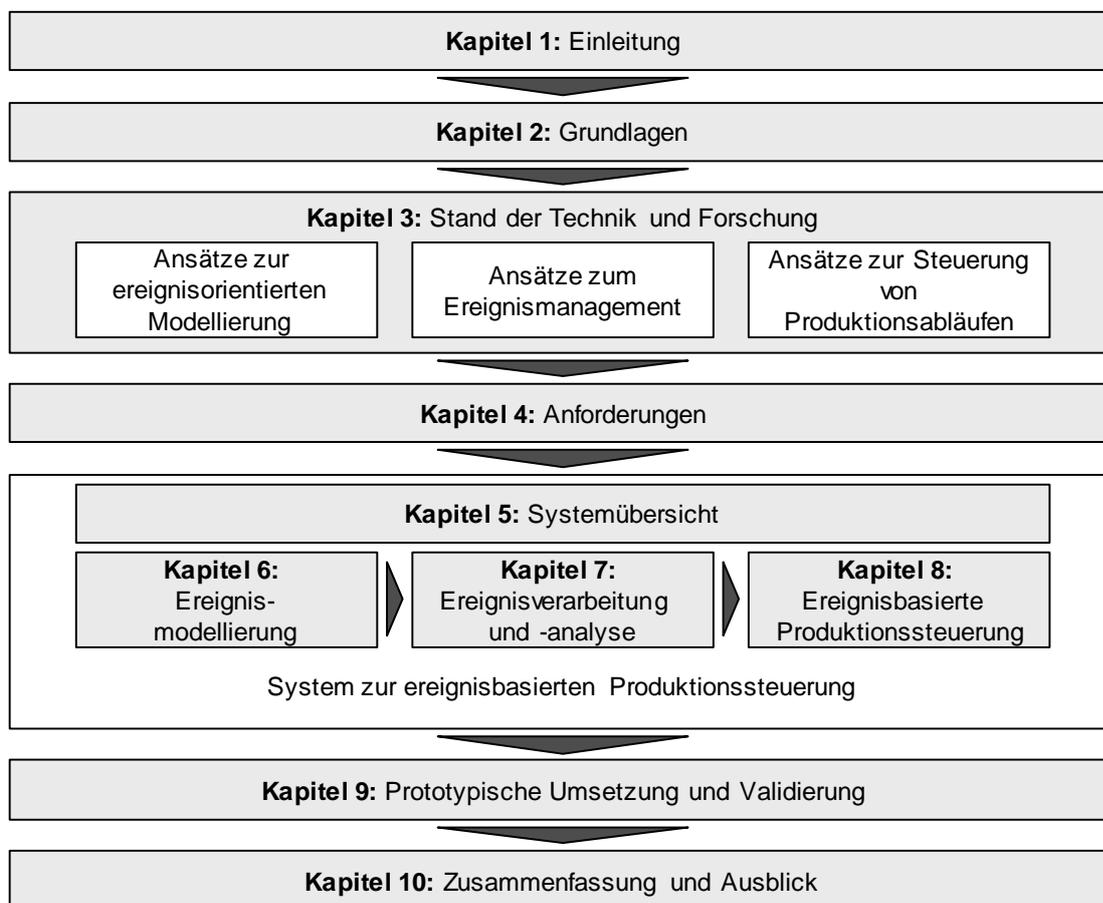


Abbildung 5: Aufbau der vorliegenden Arbeit

In *Kapitel 1* werden die Ausgangssituation, die Motivation und die Zielsetzung der Arbeit dargelegt. Die Ableitung der praxisorientierten Problemstellung, welche die Basis für die Motivation und Zielstellung des Vorhabens darstellt, erfolgt dabei mittels eines empirisch-induktiven Vorgehens. So stützen sich die Hypothesen neben dem theoretischen Vorwissen und dem aktuellen Stand der Erkenntnisse auf

der Verallgemeinerung von Beobachtungen aus industrienahen Forschungsprojekten.

Darauf basierend werden in *Kapitel 2* die für das Verständnis der Arbeit erforderlichen Grundlagen erläutert. Hierbei liegt der Fokus auf der Produktionsplanung und -steuerung, dem Informationsmanagement in der Produktion sowie der Datenverarbeitung und -analyse. *Kapitel 3* umfasst den für die vorliegende Arbeit relevanten Stand der Technik und Forschung. Im Hinblick auf die Zielstellung der Arbeit werden die ereignisorientierte Modellierung und die Strukturierung steuerungsrelevanter Informationen, Ansätze zum Ereignismanagement sowie zur Steuerung von Produktionsabläufen diskutiert. Darauf basierend leitet sich der Handlungsbedarf ab. Das Vorgehen in den Kapitel 2 und 3 lässt sich als terminologisch-deskriptiv bezeichnen, da die Schaffung eines Begriffssystems zum Verständnis der Arbeit beiträgt.

Ausgehend vom Handlungsbedarf werden in *Kapitel 4* die Anforderungen an ein System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung definiert. Die Anforderungen werden mittels eines empirisch-induktiven Vorgehens auf Basis von theoretischem Vorwissen und durch die Verallgemeinerung von Beobachtungen aus industrienahen Forschungsprojekten abgeleitet.

Auf dieser Grundlage wird in *Kapitel 5* ein Überblick über das zu entwickelnde System, dessen Elemente und deren Zusammenwirken zur Erreichung der Zielsetzung gegeben. Zunächst erfolgt im Rahmen von *Kapitel 6* die Beschreibung der erforderlichen Schritte für die Ereignismodellierung. Diese umfasst drei Ebenen der Modellierung, die Strukturierung der Ereignisdaten für die Kommunikation, die Modellierung der Ereignishierarchien sowie die Modellierung von Produktionsprozessen und Ereignisregeln. *Kapitel 7* widmet sich der Ereignisverarbeitung und -analyse. Hierfür wird die entwickelte Architektur für die Produktionssteuerung vorgestellt und die möglichen Ansätze für die Mustererkennung dargelegt. In *Kapitel 8* werden der strukturelle Aufbau und die Funktionsweise der Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung erläutert. Der Fokus dieses Kapitels liegt auf der Definition und Priorisierung von Maßnahmen und somit auf der Ereignisbehandlung. Das Vorgehen in den Kapiteln 5 bis 8 lässt sich als analytisch-deduktiv beschreiben, da hierbei die Methode an sich und die Lösungsbausteine im Detail deduktiv entwickelt werden.

Die prototypische Umsetzung und Bewertung des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung werden anhand eines realen Anwendungsbeispiels in *Kapitel 9* aufgezeigt. Die Validierung erfolgt mithilfe einer Simulationsumgebung und

1 Einleitung

anhand unterschiedlicher Maßnahmenszenarien. Zudem erfolgen im Rahmen dieses Kapitels die wirtschaftliche sowie die anforderungsbezogene Bewertung des ereignisorientierten Systems. In der abschließenden Betrachtung in *Kapitel 10* werden die Erkenntnisse und Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick auf den weiteren Forschungsbedarf gegeben.

Das Vorgehen in Kapitel 9 und 10 lässt sich wiederum als empirisch-induktiv einordnen, da die entwickelte Methode empirisch überprüft und validiert wird.

2 Grundlagen

Auf Basis einer effizienten Verarbeitung und Analyse von Daten soll mittels des zu entwickelnden Systems eine echtzeitnahe Entscheidungsunterstützung realisiert werden und somit die Produktionssteuerung verbessert werden. Aus diesem Grund werden im vorliegenden Kapitel die Grundlagen der PPS sowie des Informationsmanagements einschließlich der Datenverarbeitung und -analyse im Rahmen der Produktion erläutert. In Abschnitt 2.1 werden wichtige Grundbegriffe sowie das Zielsystem der PPS eingeführt. Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 2.2 die Beschreibung der Funktionen der innerbetrieblichen Informationssysteme zur Erfüllung der Aufgaben der PPS sowie ein Überblick über heute verfügbare Informations- und Kommunikations (IuK)-Technologien für die Produktionssteuerung. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung dieser Arbeit werden zudem in Abschnitt 2.3 ereignisorientierte Systeme sowie Verfahren zur Wissensextraktion aus großen Datenmengen betrachtet. Abschließend werden die Grundlagen in Abschnitt 2.4 in einem Fazit zusammengefasst.

2.1 Produktionsplanung und -steuerung

2.1.1 Allgemeines

Nachfolgend werden die Grundlagen der PPS erläutert. Im Fokus der Betrachtung stehen dabei die zentralen Aufgaben der Planung und Steuerung ebenso wie die teilweise konkurrierenden Zielgrößen. Einen Schwerpunkt bilden des Weiteren die für die Produktionssteuerung essenzielle Datenverfügbarkeit und die erforderlichen Reaktionszeiten. Zentrale Aufgabe der PPS ist die termin-, kapazitäts- und mengenbezogene Planung und Steuerung der Fertigungs- und Montageprozesse (EVERSHEIM 2002).

Die Abgrenzung der Begriffe *Produktionsplanung* und *-steuerung* ist im Rahmen dieser Arbeit angelehnt an die Definitionen des VDI (1992). Die Produktionsplanung umfasst demnach das „(...) *systematische Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele.*“ Die Produktionssteuerung dient hingegen dem „*Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität und Kosten und Arbeitsbedingungen.*“

2 Grundlagen

Die PPS spielt eine zentrale Rolle zur Beherrschung des Auftragsdurchlaufes auf Basis der Planungsvorgaben aus Konstruktion und Auftragsvorbereitung. Wesentliche Aufgaben der PPS sind dabei die Erstellung des Produktionsprogramms unter Berücksichtigung der verfügbaren Kapazitäten, die Ableitung der Ressourcenbedarfe sowie die bestmögliche Umsetzung des Produktionsprogramms trotz unvermeidlich eintretender Störungen, wie z. B. Personalausfall, Lieferverzögerungen oder Ausschuss. (WIENDAHL 2010)

Die Produktionsprogrammplanung ist eine rollierende Planung, die periodisch erfolgt, z. B. in einem monatlichen Zyklus (SCHUH & STICH 2012). Die Mengenplanung wird auf Basis der vom Vertrieb oder der Absatzplanung gemeldeten Endproduktbedarfe in Verbindung mit den in den Stücklisten abgelegten Informationen oder der in der Vergangenheit aufgetretenen Nachfrage durchgeführt. Im Rahmen der Termin- und Kapazitätsplanung wird im Anschluss an die Mengenplanung bestimmt, wann ein Auftrag bei vorgegebenem Endtermin gestartet werden muss. Gleichzeitig muss die Machbarkeit entsprechend der gegebenen Kapazitäten sichergestellt werden. Diese drei Aufgaben werden der Produktionsplanung zugeordnet (WIENDAHL 2010). Die Auftragsfreigabe und die Auftragsüberwachung stellen hingegen die Hauptfunktionen der Produktionssteuerung dar (HACKSTEIN 1989).

Die Teilbereiche und -aufgaben der PPS leisten einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der logistischen Zielgrößen (vgl. Abschnitt 2.1.2) und Realisierung einer wirtschaftlichen Produktion (WIENDAHL 1997).

2.1.2 Zielgrößen der Produktionsplanung und -steuerung

Das übergeordnete Ziel der PPS ist die Umsetzung einer möglichst effizienten und wirtschaftlichen Fertigung des geplanten Produktionsprogramms. Das Zielsystem der PPS gliedert sich dabei in die Logistikleistung und die Logistikkosten (vgl. Abbildung 6). Die Einhaltung der vom Kunden geforderten Termine spiegelt sich in der Logistikleistung wider. Diese umfasst die Liefertreue und die Lieferzeit. Unternehmensseitig sind hierfür eine hohe Termintreue und kurze Durchlaufzeiten Voraussetzung. Aus Unternehmenssicht sind zudem die Logistikkosten zur Erreichung einer hohen Wirtschaftlichkeit von Interesse. Die Logistikkosten setzen sich dabei aus den unternehmensinternen Kapitalbindungskosten sowie Prozesskosten zusammen.

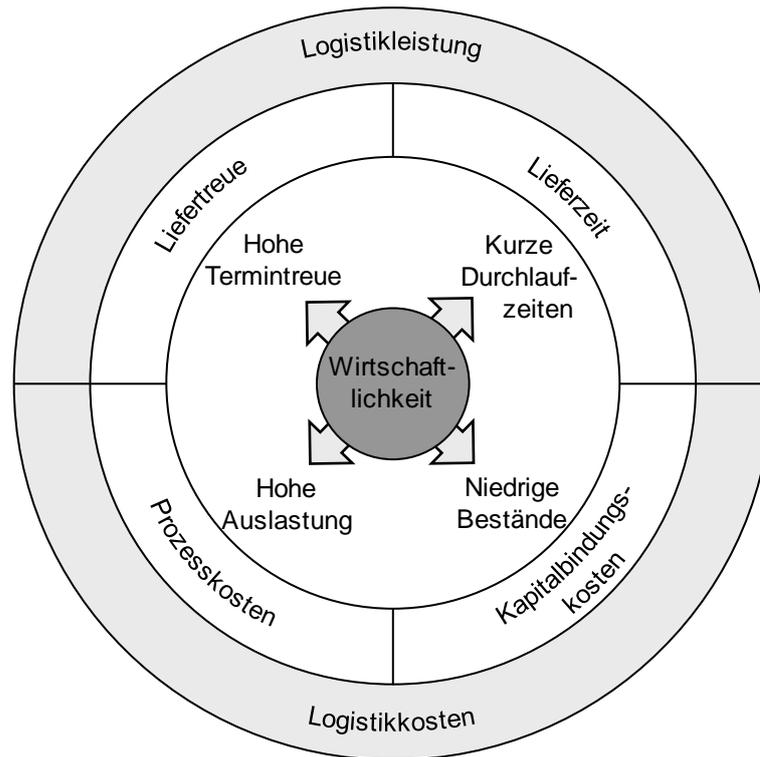


Abbildung 6: Zielsystem der Produktionslogistik (WIENDAHL 2014)

Die Kapitalbindungskosten können maßgeblich durch niedrige Bestände von Rohmaterialien, Halbfertigzeugen und Fertigbauteilen beeinflusst werden. Zur Reduzierung der Herstellkosten ist die hohe Auslastung der Ressourcen (v. a. Maschinen und Anlagen) ein entscheidender Faktor (WIENDAHL 2010). Die gleichzeitige Erfüllung einer möglichst hohen Logistikleistung und einer unternehmensinternen Forderung nach geringen Logistikkosten stellt einen Zielkonflikt für Unternehmen dar. GUTENBERG bezeichnete die gegenläufigen Beziehungen zwischen den markt- und betriebsseitigen Zielen bereits in den 1950er Jahren als „Dilemma der Ablaufplanung“ (BRAMBRING 2017). So kann beispielsweise eine gleichmäßige Auslastung der Produktionsressourcen mittels eines hohen Umlaufbestands sichergestellt werden, wodurch jedoch zusätzliche Kapitalbindungskosten verursacht werden.

Die logistischen Zielgrößen beeinflussen sich gegenseitig und lassen sich daher nicht getrennt voneinander optimieren. Dieser Zielkonflikt zwingt produzierende Unternehmen zu einer Priorisierung der Zielgrößen. Diese sog. logistische Positionierung ist eine der zentralen Aufgaben der PPS und wird maßgeblich von den individuellen Produktionstypen eines Unternehmens bestimmt. Beispielsweise spielen in der auftragsbezogenen Produktion die Termintreue und die Durchlaufzeit eine wichtigere Rolle als in der kundenanonymen Lagerfertigung. Ebenso ha-

ben die sich verschärfenden Wettbewerbsbedingungen eine Verschiebung von betriebs- zu marktseitigen Zielen zur Folge. So steht nicht mehr primär die hohe Auslastung der Ressourcen im Fokus, sondern die Erreichung kurzer Durchlaufzeiten und einer hohen Termintreue. (NYHUIS & WIENDAHL 2012)

Die PPS verfolgt damit das Ziel, eine bestandsarme Fertigung, die kurze Durchlaufzeiten und eine hohe Termintreue zur Folge hat, umzusetzen. Die unterstützenden Hilfsprozesse, wie Materialversorgung, Werkzeugbereitstellung, Numerical Control (NC)-Programmierung, und die Instandhaltung müssen dabei ebenfalls reaktionsschnell sein. (WIENDAHL 2010)

2.1.3 Aufgaben der Produktionsplanung

Basierend auf der in Abschnitt 2.1.1 vorgestellten Begriffsdefinition legt die Produktionsplanung in regelmäßigen Abständen das Produktionsprogramm entsprechend der Art und Menge der herzustellenden Produkte fest (WIENDAHL 2010). Dadurch werden der Auftragsdurchlauf für die Produktion und die Eingangsgrößen für die Produktionssteuerung bestimmt. Das Aachener PPS-Modell wurde entwickelt, um modellhaft alle im Rahmen der PPS relevanten Zusammenhänge zu beschreiben und zu erklären. Deshalb wird an dieser Stelle zur Erläuterung der Schnittstelle zwischen der Produktionsplanung und der im Rahmen der vorliegenden Arbeit im Fokus stehenden Produktionssteuerung das Aachener PPS-Modell eingeführt, das sich durch eine modulare Aufgabenstruktur auszeichnet und in nachfolgender Abbildung 7 dargestellt ist.

Das Aachener PPS-Modell unterteilt die PPS in *Netzwerk-, Kern- und Querschnittsaufgaben* und die übergeordnete *Datenverwaltung*. Kernaufgaben sind die *Produktionsprogrammplanung*, die *Produktionsbedarfsplanung* sowie die Planung und Steuerung von *Fremdbezug* und *Eigenfertigung*. Die Produktionsprogrammplanung trägt durch die Bestimmung des Produktionsprogramms und die Produktionsbedarfsplanung durch die Ableitung der benötigten Material- und Ressourcenbedarfe unmittelbar zu einem Fortschritt innerhalb des Produktionsprozesses bei (SCHUH & STICH 2012). Die Kernaufgabe der Eigenfertigungsplanung umfasst die Unteraufgaben Losgrößenrechnung, Feinterminierung, Ressourcenfeinplanung, Reihenfolgeplanung sowie die Verfügbarkeitsprüfung mit anschließender Auftragsfreigabe (SCHUH & STICH 2012). Diese Aufgaben werden im Kontext der vorliegenden Arbeit teilweise der Produktionssteuerung zugeordnet und in Abschnitt 2.1.4 aufgegriffen und detailliert beschrieben.

2.1 Produktionsplanung und -steuerung

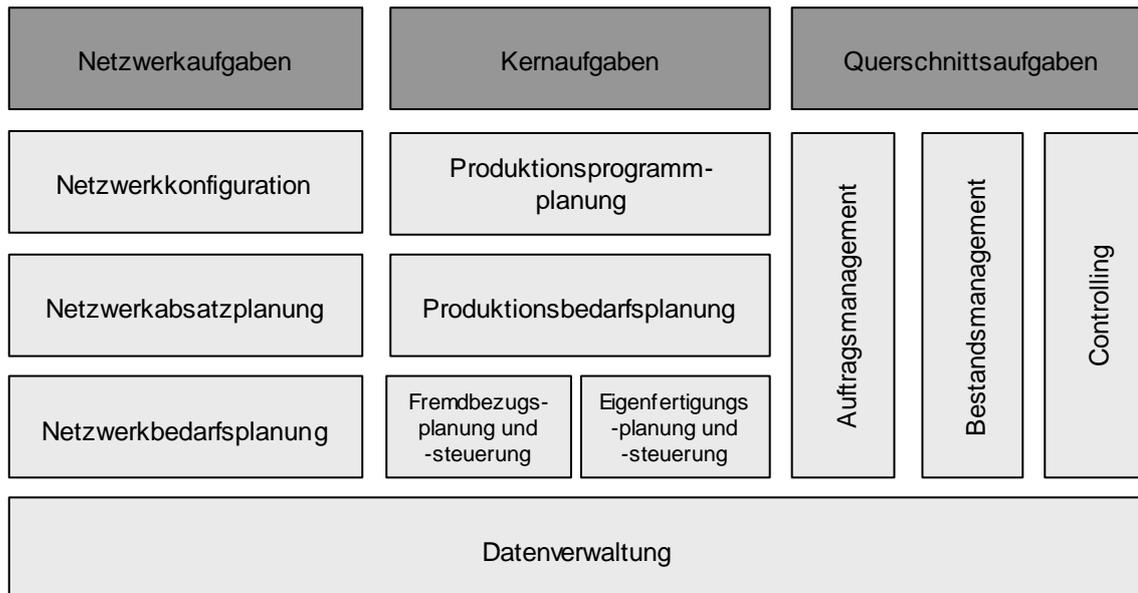


Abbildung 7: Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells (SCHUH & STICH 2012)

Aufgrund der stetigen Reduzierung der Wertschöpfungstiefe und die dadurch bedingte verstärkte Zusammenarbeit in Wertschöpfungsnetzwerken wurde das ursprüngliche Aachener PPS-Modell um die überbetrieblichen *Netzwerkaufgaben* erweitert. Als Netzwerkaufgaben werden alle überbetrieblichen Tätigkeiten der PPS verstanden. Dazu zählen die strategisch wichtige *Netzwerkconfiguration* sowie die *Netzwerkabsatz-* und *-bedarfsplanung*. (SCHUH & STICH 2012)

Querschnittsaufgaben nehmen eine koordinierende Rolle zwischen Netzwerk- und Kernaufgaben ein und umfassen planende und steuernde Aufgaben, wie das *Auftragsmanagement*, das *Bestandsmanagement* und das *Controlling* (SCHUH & STICH 2012). Diese dienen der Integration über- und innerbetrieblicher Aufgaben der PPS sowie der ganzheitlichen Optimierung.

Die *Datenverwaltung* hat Einfluss auf alle Hauptaufgaben, da zu ihrer Bearbeitung auf vorhandene Daten zurückgegriffen werden muss und neu entstehende Daten gespeichert werden müssen. Sie spielt insbesondere für komplexe Systeme eine zentrale Rolle. (SCHUH & STICH 2012)

Die Netzwerks- und Querschnittsaufgaben sowie die Kernaufgabe der Fremdbezugsplanung und -steuerung spielen hinsichtlich der Entwicklung einer ereignisbasierten Produktionssteuerung eine untergeordnete Rolle und werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter detailliert. Die Eigenfertigungssteuerung im Sinne der Produktionssteuerung wird in Abschnitt 2.1.4 behandelt. Eine nähere Betrachtung der Datenverwaltung bzw. des Informationsmanagements erfolgt im

2 Grundlagen

Abschnitt 2.2. Im Hinblick auf den Fokus der vorliegenden Arbeit wird die Produktionsplanung nur überblicksmäßig dargestellt. Für eine ausführliche Darstellung sei daher an dieser Stelle auf die weiterführende Literatur, wie z. B. HACKSTEIN (1989), KURBEL (2005), SCHUH & STICH (2012), LÖDDING (2008) verwiesen.

2.1.4 Aufgaben der Produktionssteuerung

Die Produktionssteuerung ist Bindeglied zwischen den planenden und ausführenden Bereichen eines produzierenden Unternehmens. Ihre zentrale Aufgabe ist die bestmögliche Umsetzung der Vorgaben aus der Produktionsplanung trotz des Eintretens von Änderungen hinsichtlich Auftragsmenge und -termin sowie unvermeidbarer Störungen. Somit leistet die Produktionssteuerung einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der logistischen Zielgrößen (DANGELMAIER 2009). Das in Abbildung 8 dargestellte Modell zur Fertigungssteuerung nach LÖDDING (2008) beschreibt die Aufgaben der Produktionssteuerung und deren Einflüsse auf die logistischen Zielgrößen. Stell-, Regel- und Zielgrößen sind Elemente des Modells, die durch Wirkzusammenhänge miteinander verknüpft sind.

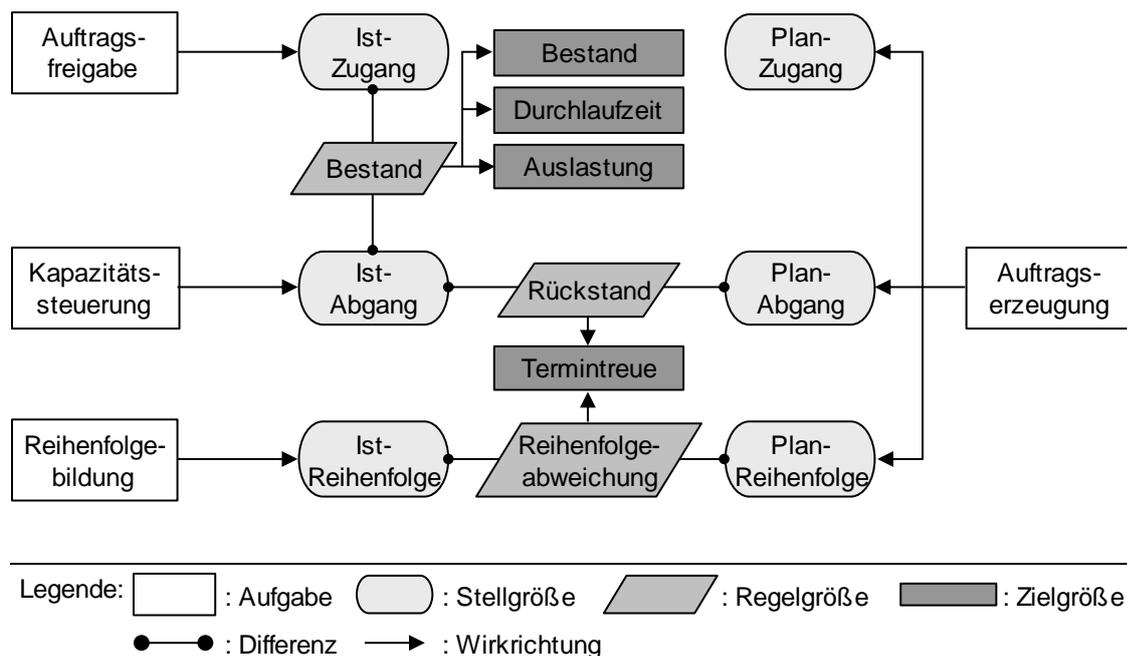


Abbildung 8: Modell der Fertigungssteuerung (LÖDDING 2008)

Die Aufgaben – *Auftragserzeugung*, *Auftragsfreigabe*, *Reihenfolgebildung* und *Kapazitätssteuerung* – legen die Stellgrößen fest. Die Regelgrößen ergeben sich als Abweichung von zwei Stellgrößen und beeinflussen wiederum die logistischen Zielgrößen.

Im Rahmen der *Auftragserzeugung* werden die Planwerte für den Zu- und Abgang der Fertigung und die Reihenfolge der Aufträge bestimmt. Die Auftragserzeugung wird daher im Allgemeinen der Produktionsplanung zugeordnet. Verfahren zur Auftragserzeugung, die auf einfachen Regeln basieren und sich durch einen kurzen Entscheidungshorizont auszeichnen, werden allerdings der Produktionssteuerung zugeordnet. Ein Beispiel hierfür ist die Auftragserzeugung in der Lagerfertigung mittels Kanban-Steuerung. (LÖDDING 2008)

Die *Auftragsfreigabe* legt den Ist-Zugang zur Fertigung durch die Bestimmung der Startzeitpunkte für die Bearbeitung der Aufträge fest, damit gehen die Aufträge von der Planung in die Ausführung über. Dieser Schritt beeinflusst maßgeblich den Umlaufbestand in der Produktion. Vor der Freigabe und dem Start der tatsächlichen Fertigung ist sicherzustellen und zu prüfen, dass die verplanten Ressourcen, z. B. Personal, Material, Maschinen oder Werkzeuge, verfügbar sind. (SCHUH & STICH 2012)

Die *Kapazitätssteuerung* gibt die kurzfristige Anpassung der Höhe der eingesetzten Kapazitäten der Arbeitssysteme für die Fertigung vor. Dazu legt sie die Arbeitszeiten der Mitarbeiter fest und ordnet die Mitarbeiter den einzelnen Arbeitssystemen zu. Zur Kompensation von Störungen und drohenden Rückständen entscheidet die Kapazitätssteuerung über Maßnahmen, wie z. B. Überstunden und Zusatzschichten der Mitarbeiter, im Rahmen der möglichen Kapazitätsflexibilität. Die Kapazitätssteuerung wirkt damit hauptsächlich auf den Ist-Abgang der Produktion, welcher wiederum die Höhe der Umlaufbestände und den Rückstand beeinflusst. Dadurch hat die Kapazitätssteuerung Einfluss auf alle vier logistischen Zielgrößen. (GOTTSCHALK 2005, LÖDDING 2008, WIENDAHL 2010, NYHUIS ET AL. 2010, ENGELHARDT 2015)

Die *Reihenfolgebildung* dient der Festlegung der Sequenz, in der wartende Aufträge an einem Arbeitssystem abgearbeitet werden. Für die Priorisierung der Aufträge in der Warteschlange stehen in Abhängigkeit der logistischen Zielsetzung unterschiedliche Prioritätsregeln und Steuerungsverfahren zur Auswahl. Häufig eingesetzte Prioritätsregeln sind u. a. First In - First Out (FIFO), Kürzeste Operationszeit (KOZ), Längste Operationszeit (LOZ) und geringster Restschlupf (LÖDDING 2008). Dabei werden den Aufträgen anhand bestimmter Kriterien, wie beispielsweise der verbleibenden Schlupfzeit oder der Bearbeitungszeit, Prioritäten zugewiesen und somit die Ist-Reihenfolge der Aufträge definiert. Die Reihenfolgebildung wirkt über die Regelgröße *Reihenfolgeabweichung* auf die logistische

2 Grundlagen

Zielgröße der Termintreue. Der Reihenfolgebildung kommt insbesondere in Produktionsumgebungen mit erhöhten Umlaufbeständen eine hohe Wichtigkeit im Hinblick auf die Termintreue zu. (NYHUIS & WIENDAHL 2012)

Im Rahmen der Arbeit ist ebenso die *Auftragsüberwachung* von zentraler Bedeutung. Sie umfasst die Überwachung des kompletten Durchlaufs eines Auftrags von der Freigabe bis zur Fertigstellung. Störungen und unvorhergesehene Ereignisse sollen identifiziert und adäquate Maßnahmen zur Minimierung der Konsequenzen eingeleitet werden. Grundlegende Voraussetzung dafür ist eine hinreichende Transparenz über den aktuellen Fortschritt eines Auftrags durch einen regelmäßigen Abgleich von Plan- und Ist-Daten aus der Produktion. Die Auftragsüberwachung zur Fortschrittsverfolgung erfolgt dabei üblicherweise durch ein Betriebsdatenerfassungssystem (BDE). Darüber hinaus ist es durch den Einsatz von IuK-Technologien möglich, die eingesetzten Produktionsressourcen (z. B. Maschinen, Werkzeuge und Materialien) ebenfalls zu überwachen und somit im Falle von erheblichen Planabweichungen zielführende Maßnahmen anzustoßen. (ENGELHARDT 2015)

Im Rahmen der Entwicklung einer ereignisbasierten Steuerung sollen mithilfe der kontinuierlichen Überwachung der Ereignisströme Abweichungen und Störungen im Produktionsablauf zeitnah erkannt werden und darauf basierend adäquate Maßnahmen definiert und priorisiert werden, um positiv auf den Produktionsablauf einzuwirken. Aus diesem Grund haben die Auftragsüberwachung und das damit verbundene Informationsmanagement in der Produktion eine hohe Relevanz. Wie in Abschnitt 1.2 dargestellt, stellen Informationen zur aktuellen Produktionssituation einen wesentlichen Erfolgsfaktor der Produktionssteuerung dar (SCHUH ET AL. 2015), weshalb das Informationsmanagement in der Produktion im folgenden Abschnitt detailliert betrachtet wird.

2.2 Informationsmanagement in der Produktion

2.2.1 Allgemeines

Die Bewältigung der im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Herausforderungen der PPS erfordert den Umgang mit einer Vielzahl von Daten und Informationen (KRCMAR 2011, SCHUH ET AL. 2014). Zur Beherrschung der immer komplexer und dynamischer werdenden Abläufe und Materialflüsse in der Produktion bei

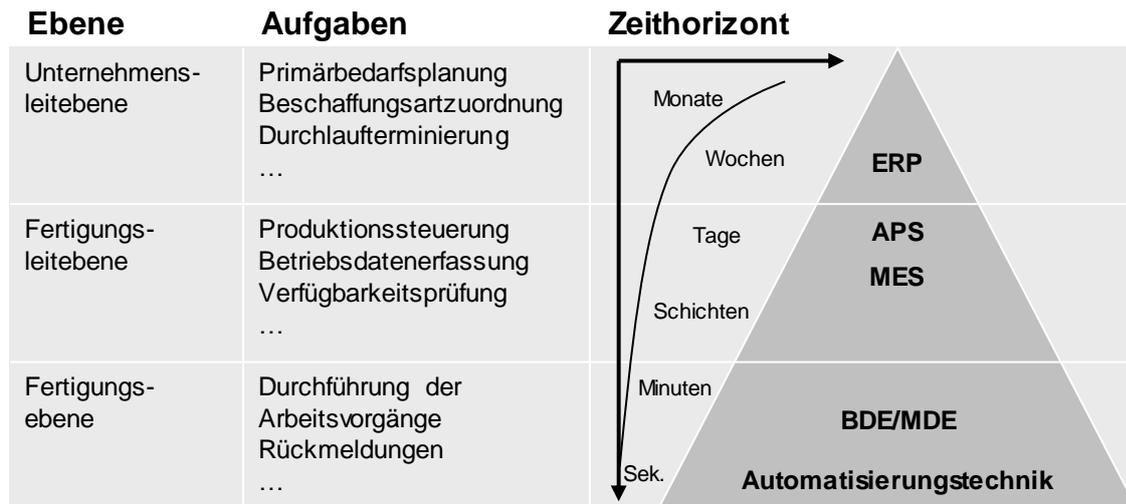
gleichzeitig kurzen Lieferzeiten stehen verschiedene Softwaresysteme zur Verfügung. Diese Systeme haben die Aufgabe, große Datenmengen zu verarbeiten und zu speichern, Informationen auszutauschen und dadurch eine hohe Informationsverfügbarkeit und Vernetzung von Maschinen und Anlagen sicherzustellen (SCHUH ET AL. 2015). Unter Daten werden dabei Zeichen verstanden, die über eine Syntax in einen strukturierten und definierten Zusammenhang gebracht und somit einer weiteren Verarbeitung zugänglich gemacht werden (KRCMAR 2011). Wird diesen Daten ein Kontext und ein Zweck zugewiesen, erhalten sie eine Bedeutung und werden somit als Information bezeichnet (DIN 44300, LEHNER ET AL. 2008, KRCMAR 2011).

Im Rahmen aktueller Forschungs- und Entwicklungsbestrebungen unter dem Begriff „Industrie 4.0“ gilt die Informationstechnik (IT) als ein Hauptbefähiger für die Verbesserung von Entscheidungsfindungsprozessen (SCHUH ET AL. 2015, WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016). Die Planung, Steuerung und Kontrolle des Produktionsfaktors Information werden als Aufgaben des sog. *Informationsmanagements* zusammengefasst. Zur Erreichung der Ziele der Produktionssteuerung spielt ein gut funktionierendes Informationsmanagement eine zentrale Rolle. Es muss sichergestellt werden, dass entscheidungsrelevante Informationen über den aktuellen Zustand der betrachteten Produktion rechtzeitig am richtigen Ort und in der notwendigen Qualität zu minimalen Kosten vorliegen. Durch das Informationsmanagement wird somit die nötige Transparenz in Form einer vollständigen, konsistenten und aktuellen Datengrundlage geschaffen, als Basis für eine effektive, robuste und flexible Produktionssteuerung. (KURBEL 2005, WIENDAHL ET AL. 2005, SCHUH & STICH 2012)

2.2.2 Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung

Die zur PPS eingesetzten IT-Systeme unterstützen den Anwender bei der Planung, Steuerung und Überwachung der Produktion und übernehmen die damit verbundene Datenverwaltung. Wie in Abbildung 9 dargestellt, können die IT-Systeme zur Unterstützung der PPS nach VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1 entsprechend ihrer funktionalen Aufgaben und der unterschiedlichen Zeithorizonte in drei Hierarchieebenen – Unternehmensleitebene, Fertigungsleitebene und Fertigungsebene – eingeteilt werden. (VDI 5600, KLETTI 2006)

2 Grundlagen



Legende:

ERP: Enterprise Resource Planning

MES: Manufacturing Execution System

APS: Advanced Planning and Scheduling

MDE: Maschinendatenerfassung

BDE: Betriebsdatenerfassung

*Abbildung 9: Ebenen und Aufgaben von PPS-Softwaresysteme
in Anlehnung an VDI (5600), KLETTI (2006)*

Auf der *Unternehmensleitebene* kommen vorrangig Systeme zum Einsatz, die die Aufgaben der sowohl kaufmännischen als auch der technischen Auftragsabwicklung abdecken. Diese werden als *Enterprise Resource Planning* (ERP) bezeichnet (KURBEL 2005, MARCZINSKI 2008) und beziehen sich auf einen längeren Planungshorizont von Wochen bis hin zu Monaten. Auf dieser Ebene wird in der Literatur auch von PPS-Systemen gesprochen. Diese bilden den Kern des Informationssystems eines produzierenden Unternehmens und beinhalten die Material-, Zeit- und Kapazitätswirtschaft auf Basis von Arbeitsplänen. PPS-Systeme basieren auf dem sog. Material Requirements Planning (MRP), das sich auf die Unterstützung der Materialwirtschaft anhand der Ermittlung der Nettobedarfe über Stücklistenauflösung und Abgleich von Lagerbeständen fokussiert. Dieser MRP-Ansatz wurde durch die Terminierung der Fertigungsaufträge gegen begrenzte Ressourcen und die Bildung wirtschaftlicher Fertigungs- und Montagelose zum sog. Manufacturing Resource Planning (MRP II) weiterentwickelt (SCHUH & STICH 2012). Der MRP II-Ansatz erlaubt eine Grob-, Mittel- und Feinplanung mittels einer zyklischen Planung in Stufen zunehmender Genauigkeit (WIENDAHL 2014). Das MRP II-Konzept wird in der Literatur häufig als konventionelles PPS-Verfahren bezeichnet, da es den Kern vieler bestehender PPS-Systeme darstellt. (HOPP & SPEARMAN 2008, ARNOLD 2008, FUCHS 2013)

In Ergänzung dazu vereinen ERP-Systeme zusätzlich betriebswirtschaftliche Funktionen, wie z. B. Rechnungswesen und Personalwirtschaft. ERP- und PPS-Systeme übernehmen die Grobplanung mit einem Planungshorizont von mehreren Wochen. Um eine kurzfristige Feinplanung bezogen auf die nächsten Tage bzw. Schichten im Rahmen der *Fertigungsleitebene* zu ermöglichen, werden ERP-Systeme teilweise mit *Advanced Planning and Scheduling-Lösungen* (APS) und *Manufacturing Execution-Systemen* (MES) gekoppelt (MARCZINSKI 2008, HOPP & SPEARMAN 2008). APS-Systeme fokussieren das Ziel, eine möglichst kostengünstige und gemäß den logistischen Zielgrößen ideale Maschinenbelegungsplanung vorzunehmen. Dabei wird die Planungsaufgabe in Teilprobleme zerlegt und mithilfe exakter mathematischer Optimierungsalgorithmen die Feinplanung durchgeführt. Zur Vorhersage zukünftiger Entwicklungen kommen zudem Heuristiken zum Einsatz. (DUDEK ET AL. 2002, KLETTI 2006)

Aufgrund der Informationslücke zwischen der Fertigung und den ERP-Systemen sind MES entwickelt worden. Neben der Feinterminierung der Fertigungsaufträge bietet ein MES die Möglichkeit der zeitnahen Steuerung der Produktion, des Betriebsmittelmanagements und der Erfassung und Kontrolle der aktuellen Auftragsfortschritte, womit eine wesentlich schnellere Reaktion auf Abweichungen in der Fertigung ermöglicht wird (KLETTI 2006, MARCZINSKI 2008, VDI 5600, THIEL ET AL. 2008). Die Auftragsüberwachung zur Fortschrittsverfolgung erfolgt dabei über Systeme der *Betriebsdatenerfassung* (BDE), welche das informationstechnische Bindeglied zwischen der Fertigungsebene und der Leitebene bilden und in der Praxis inzwischen weitreichende Anwendung finden (MAYER ET AL. 2016). BDE-Systeme sind häufig direkt in MES integriert (BERLAK 2003, MARCZINSKI 2008). Auf der *Fertigungsebene* werden die Ist-Daten neben BDE auch über *Maschinendatenerfassung* (MDE) aufgenommen, damit wird eine minuten- und sekundengenaue Datenerfassung abgedeckt. Die Rückmeldung der Daten kann manuell oder mithilfe der verwendeten Automatisierungstechnik, wie beispielsweise speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) oder Sensoren, erfolgen (VDI 5600). Auf dieser untersten Ebene erfolgt die Umsetzung der Fertigung anhand der Vorgaben der Leitebenen auf Maschinen, Anlagen und Arbeitsplätzen. Je nach Unternehmen unterscheiden sich der Umfang der Softwareunterstützung sowie die Trennschärfe zwischen den einzelnen Ebenen (LOUIS 2009).

2.2.3 Informations- und Kommunikationstechnologien

Moderne IuK-Technologien dienen als Bindeglied zwischen der physischen und der virtuellen Welt. Durch die Rückmeldung der aktuellen Produkt- und Ressourcenzustände an die IT-Systeme ermöglichen sie die Überwachung der Produktionsabläufe. Auf dieser Basis kann eine flexible und adaptive Produktionssteuerung realisiert werden (ENGELHARDT 2015). Die Qualität und die Aktualität der Daten stellen dabei entscheidende Erfolgsfaktoren für die Produktionssteuerung dar (BRAMBRING 2017).

Automatische Identifikationstechnologien (Auto-ID-Technologien) spielen in diesem Kontext eine zentrale Rolle bei der Datenerfassung sowie Identifikation und Lokalisierung einzelner Objekte (KERN 2007). Auto-ID ist ein Überbegriff für die unterschiedlichen Verfahren, wie z. B. Barcode, Radiofrequenzidentifikation (RFID) und optische Erkennungen mithilfe von Kameras. Automatische Identifizierung ermöglicht die Verbindung von Informations- und Materialflüssen und bildet somit eine Grundlage für das Internet der Dinge. Im Sinne der Datenspeicherung stehen dabei grundsätzlich zwei Ansätze zur Auswahl; so kann der Transponder vorrangig zur Identifikation dienen (ID-on-Tag/Data-on-Network) oder zusätzlich spezifische produktbezogene Daten mitführen (Data-on-Tag) (GÜNTNER & CHISU 2010). In Produktion und Logistik haben 1D-/2D-Codierverfahren mittlerweile eine weite Verbreitung. Sie zählen zu den optischen Verfahren und sind auf Sichtkontakt zwischen Lesegerät und Informationsträger angewiesen. Neben eindimensionalen Codes, wie beispielsweise Strichcodes, wurden zweidimensionale Codes, wie z. B. Matrix-, Stapel-, Composite- und Dotcodes, entwickelt, um einen höheren Speicherplatz zu bieten. 1D-/2D-Codierverfahren eignen sich besonders für die zentrale Datenhaltung. Hierbei wird eine Referenz auf die z. B. in der Cloud hinterlegten Informationen codiert (GORECKY ET AL. 2017).

RFID basiert hingegen auf elektromagnetischen Feldern und ermöglicht somit eine berührungslose Kommunikation ohne Sichtkontakt (KERN 2007, FINKENZELLER 2008). Nach VDI-Richtlinie 4416 besteht ein RFID-System aus den drei Komponenten Transponder, Lese-/Schreib-Gerät und Rechner, wobei der Transponder ein elektronischer Datenträger ist, der aus einem Kopplungselement und einem Mikrochip besteht. Der Sender überträgt Informationen über das elektromagnetische Feld an den Empfänger. Bei der RFID-Technologie gilt es, zwischen unterschiedlichen Frequenzen (z. B. hochfrequent (HF) und ultrahochfrequent (UHF)) sowie zwischen aktiven und passiven Systemen zu unterscheiden. Dabei nehmen passive

Transponder die erforderliche Energie aus dem elektromagnetischen Feld des Lesegerätes auf. Aktive Transponder sind hingegen mit einer eigenen Stromversorgung ausgestattet und daher teurer, können jedoch eine höhere Reichweite abdecken. Die RFID-Technologie eignet sich insbesondere für die Realisierung einer dezentralen Datenhaltung (GORECKY ET AL. 2017). Neben der RFID-Technologie wurden im Bereich der aktiven Lokalisierungssysteme verschiedene Ortungstechnologien auf Basis von hochfrequenter elektromagnetischer Strahlung, wie beispielsweise Bluetooth, Wireless Local Area Networks (WLAN) und Ultrawideband (UWB), entwickelt. Im Gegensatz zu passiven RFID-Systemen kann mit diesen Ortungstechnologien eine flächendeckende Ortung realisiert werden (HILTY 2012). Für eine sichere Datenübertragung über kurze Distanzen wurde hingegen basierend auf der RFID-Technologie der Standard Near Field Communication (NFC) entwickelt (LANGER & ROLAND 2010).

Die vorgestellten Technologien bieten das Potenzial, umfangreiche echtzeitnahe Informationen aus der Produktion aufzunehmen, um somit den Ist-Zustand der Produktion konsistent abzubilden. Dabei werden große Datenmengen durch hohe Abstraten erzeugt. Diese gilt es, mit den im nachfolgenden Abschnitt beschriebenen Ansätzen zu filtern und zu analysieren. Ziel ist es, mithilfe dieser Daten Transparenz zu schaffen und somit Unterstützung bei der Entscheidungsfindung im Rahmen der Produktionssteuerung zu bieten.

2.3 Datenverarbeitung und -analyse

2.3.1 Allgemeines

Die wachsenden technischen Fähigkeiten und gleichzeitig sinkenden Kosten für Sensoren führen zu einer Verbreitung von Sensornetzwerken auch in produzierenden Unternehmen. Insbesondere die in Absatz 2.2.3 beschriebenen Auto-ID-Technologien sind weit verbreitet. So geben über 60 % der Teilnehmer der eingangs genannten Studie an, dass sie bereits Auto-ID-Systeme verwenden (MAYER ET AL. 2016). Dabei erzeugen die Sensornetzwerke innerhalb kurzer Taktzyklen kontinuierlich große Datenmengen. Die entstehenden Daten besitzen für sich genommen lediglich einen geringen Informationsgehalt, wie z. B. Sensor-ID, Zeitstempel oder Messwert, und lassen sich somit einer geringen Abstraktionsebene zuordnen (BRUNS & DUNKEL 2010). Aus Unternehmenssicht ist es nicht sinnvoll, die Datenflut einzelner Sensoren ungefiltert an die Geschäftsebene weiterzuleiten. Statt-

2 Grundlagen

dessen muss eine sinnvolle Aufbereitung und Aggregation der Daten erfolgen. Unternehmen stehen folglich vor der Herausforderung, Beziehungen und Muster in den kontinuierlichen Ereignisströmen zu erkennen und darauf basierend höherwertige für den Produktionsablauf relevante, aussagekräftige Ereignisse zu generieren sowie bei Bedarf passende Aktionen auszulösen. Als Bindeglied zwischen der physikalischen Welt und der IT-Infrastruktur ist aus diesem Grund eine Ereignisverarbeitung erforderlich, die in diesem Kontext als eine Art Middleware (Zwischenanwendung) agiert.

Eine Technologie, die sich in den letzten Jahren für die Ereignisverarbeitung etabliert hat, ist das sog. CEP zur komplexen Ereignisanalyse und Datenstromverarbeitung. Es handelt sich hierbei um Methoden, Techniken und Werkzeuge zur Verarbeitung von Ereignissen, während sie passieren, d. h. kontinuierlich und zeitnah. CEP ist dabei in der Lage, höheres und wertvolles Wissen in Form von komplexen Ereignissen, die sich durch die Kombination mehrere Ereignisse ergeben, abzuleiten (ECKERT & BRY 2009). CEP wird eingesetzt, um außergewöhnliche Werte, wie Ausreißer oder Trends (beispielsweise eine längerfristige Erhöhung der Temperatur oder steigende Fehlerraten), in den Datenströmen zu identifizieren. Die Daten werden auf die relevante Aussage reduziert. Anschließend werden ausschließlich diese Informationen an die Steuerungsebene weitergegeben (SCHÖNING & DORCHAIN 2014). Wenn aktuelle Daten aus der Produktion vorliegen, insbesondere Störungen und Abweichungen der Unternehmens- und Fertigungsleit-eben (ERP, MES), kann zeitnah mit z. B. Umplanungen und Veränderungen in den aktuellen Logistikvorgängen oder Kapazitätsanpassungen reagiert werden. Diese Situationen stellen schwer lösbare Optimierungsprobleme für die Entscheidungsträger dar, da unterschiedliche Einflussgrößen und deren Wechselwirkungen bei gleichzeitig kurzen Antwortzeiten zu berücksichtigen sind. Mithilfe von Datenanalysetechnologien wie CEP in Verbindung mit Online-Optimierungsansätzen kann durch die Kopplung der Datenanalyseergebnisse mit den Geschäftsprozessen ein Nutzen für die Produktionssteuerung generiert werden (SCHÖNING & DORCHAIN 2014).

Die Echtzeitanalyse der Daten, die sog. *Realtime Analytics* ist die Disziplin, die Logik auf Daten anwendet, um Erkenntnisse für schnellere Entscheidungen zu liefern. Dabei bedeutet Echtzeit je nach Anwendungsfall, dass die Analyse innerhalb weniger Sekunden oder Minuten nach dem Eintreffen neuer Daten abgeschlossen ist (STANGL ET AL. 2016). Es lassen sich zwei unterschiedliche Ansätze der Echtzeitanalyse unterscheiden. Bei „On-Demand“-Echtzeitanalysen fordern Benutzer oder Systeme eine Abfrage an und erhalten daraufhin die Analyseergebnisse. Das

Konzept des CEP zählt dagegen zu den kontinuierlichen Echtzeitanalysen, welche proaktiver sind und Benutzer benachrichtigen oder Antworten auslösen, wenn Ereignisse eintreten (VIDAČKOVIĆ 2014, GARTNER 2017). Für eine effiziente Analyse der Ereignisse und eine rechtzeitige Entscheidungsfindung ist eine enge bidirektionale Verknüpfung der Produktion mit den übergeordneten Leitsystemen eine wesentliche Voraussetzung. Aufgrund der hohen Echtzeitanforderungen im Produktionsumfeld ist zudem die lokale Vorverarbeitung von Daten von zentraler Bedeutung. In diesem Zusammenhang findet das sog. Edge-Computing Anwendung. Durch den Einsatz von CEP auf Basis von Edge-Computing kann die lokale Vorverarbeitung und Handhabung großer Datenmengen in Echtzeit ermöglicht werden (WINKELHAKE 2017). Mithilfe von CEP können somit zeitkritische Daten kontinuierlich in Echtzeit analysiert werden, um durch das Auslösen von Aktionen steuernd in den Produktionsprozess einzugreifen.

Dieser Ansatz hebt sich dadurch von Business Intelligence-Lösungen im Produktionsbereich ab, die vergangenheitsbasierte Datenanalysen zur Wissensextraktion durchführen und die Ergebnisse in sog. Produktionscockpits darstellen (KLETTI 2006). Die Ereignisorientierung und die Wissensextraktion aus Datenbanken stellen zwei grundsätzlich unterschiedliche Herangehensweise dar. Die beiden Ansätze konkurrieren jedoch nicht, sondern bieten die Möglichkeit einer kombinierten Nutzung. Nachfolgend werden diese beiden Konzepte detailliert erläutert.

2.3.2 Ereignisorientierte Systeme

Die drei grundlegenden Prozessschritte *Erkennen*, *Verarbeiten* und *Reagieren* sind charakteristisch für ereignisorientierte Systeme (BRUNS & DUNKEL 2010). Abbildung 10 zeigt den Zyklus ereignisgesteuerter Systeme. Nach BRUNS & DUNKEL (2010) können die grundlegenden Schritte wie folgt beschrieben werden:

Erkennen

Das Erkennen relevanter Daten und Informationen, die von unterschiedlichen Ereignisquellen (z. B. Sensoren) erzeugt werden, ist Ausgangspunkt für die weitere Verarbeitung. Daten und Informationen werden als Ereignisse vom System interpretiert und spiegeln den aktuellen Zustand der Produktionsprozesse wider. Entscheidend ist dabei, dass die Ereignisse ohne zeitliche Verzögerung, d.h. unmittelbar identifiziert werden.

Verarbeiten

Im Rahmen des Verarbeitungsschritts erfolgt die Analyse der Ereignisse. Diese können dabei aggregiert, korreliert, abstrahiert, klassifiziert oder verworfen werden. Die Verarbeitung basiert auf vorab definierten Mustern, sog. *event patterns*, die Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den Ereignissen ausdrücken. Relevante Muster sollen in den Ereignisströmen erkannt werden, um somit Situationen zu identifizieren, die eine Reaktion erfordern (ETZION & NIBLETT 2010).

Reagieren

Sobald ein Muster im Ereignisstrom erkannt wurde, können unterschiedliche Reaktionen zeitnah angestoßen werden. Typische Reaktionen in diesem Kontext sind dabei z. B. das Schicken von Warnmeldungen, der Aufruf eines Service oder die Initiierung von Aktionen durch menschliche Benutzer. Zudem ist auch die Generierung neuer Ereignisse beispielsweise auf einer höheren Abstraktionsebene eine mögliche Reaktion.

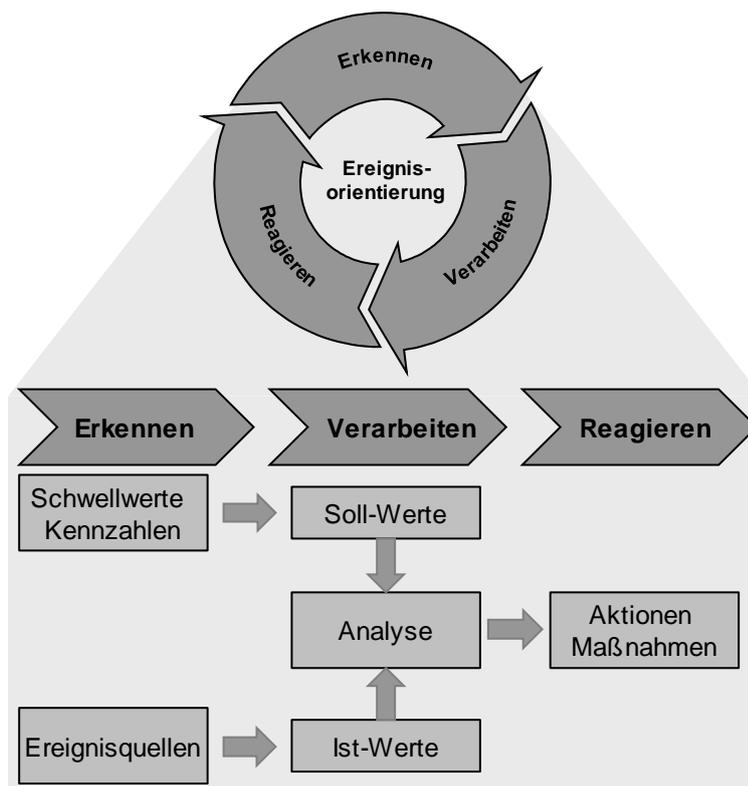


Abbildung 10: Prozessschritte ereignisorientierter Systeme in Anlehnung an BRUNS & DUNKEL (2010) und SPRINGER (2017)

In der Literatur werden im Zusammenhang mit der Ereignisorientierung drei Arten von Event Processing unterschieden (vgl. MICHELSON 2006):

- *Simple Event Processing* löst aufgrund des Auftretens einfacher Ereignisse Aktionen in anderen Systemen aus. Ziel ist es dabei, in Echtzeit oder mit geringer Verzögerung Einfluss auf Prozesse nehmen zu können.
- *Stream Event Processing* umfasst die Verarbeitung sowohl von einfachen als auch höherwertigen Ereignissen. Einfache Ereignisse, wie Aufträge, RFID-Events oder Transaktionen, werden entsprechend ihrer Relevanz gefiltert und an Empfänger übermittelt. Bei Stream Event Processing steht die Nutzung der Informationen im Vordergrund, um zeitnah Entscheidungen zu treffen.
- *Complex Event Processing* untersucht die Abhängigkeiten zwischen den Ereignissen, um darauf basierend Aktionen auszulösen. Es kann sich dabei um einfache und höherwertige Ereignisse unterschiedlicher Art handeln, die auf verschiedene Weise miteinander in Beziehung stehen (z. B. kausal, temporal, lokal). CEP setzt spezielles Wissen in der Anwendung von Mustern, Ereignisdefinitionen und dem Korrelieren von Mustern und Ereignissen voraus. Der Fokus liegt dabei auf dem Erkennen von und dem Reagieren auf Abweichungen und Störungen in den Prozessen, um neue Geschäftsmöglichkeiten zu nutzen.

Da diese Unterscheidungen theoretische Ansätze ohne konzeptionelle Auswirkungen auf die Ausgestaltung des ereignisorientierten Systems sind, werden im Rahmen dieser Arbeit alle drei Begriffe unter CEP subsumiert (SPRINGER 2017).

David LUCKHAM veröffentlichte im Jahr 2002, in seiner Funktion als Professor an der Fakultät Elektrotechnik der Stanford University, das Buch „The Power of Events: An Introduction to Complex Event Processing in Distributed Enterprise Systems“ (LUCKHAM 2002). Er erläutert darin unterschiedliche Vorarbeiten im Bereich der Ereignisverarbeitung und führt diese zum Konzept des CEP zusammen. Dies stellt einen entscheidenden Meilenstein für die Etablierung der Ereignisorientierung als Fachdisziplin dar (BRUNS & DUNKEL 2010). Ziel der Ereignisverarbeitung ist die kontinuierliche Analyse von Ereignisströmen mit geringer Latenzzeit. Die verarbeitenden CEP-Komponenten werden in Anlehnung an LUCKHAM (2002) als *Event Processing Agent* (EPA) bezeichnet. Zentrales Element eines Agents ist die Event Processing Engine. Die Engine ist der Softwarebaustein, der einen Ereignisstrom anhand festgelegter Regeln analysiert. Abbildung 11 zeigt einen schematischen Aufbau eines EPA mit seinen grundlegenden Elementen.

2 Grundlagen

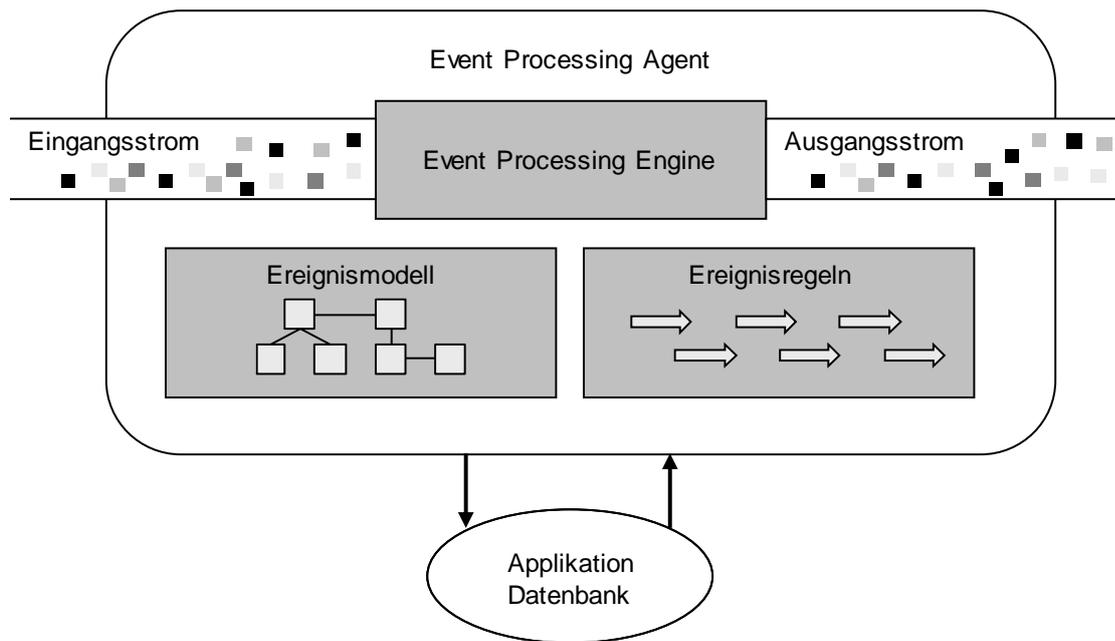


Abbildung 11: Event Processing Agent in Anlehnung an BRUNS & DUNKEL (2010)

Die Elemente des EPA haben die folgenden Aufgaben:

- Ereignismodell: Hier sind Metadaten, wie das Fach- und Problemlösungswissen, hinterlegt.
- Ereignisregeln: Diese sind in der jeweiligen *Event Processing Language* (EPL) des eingesetzten Softwareprodukts zu formulieren, folgen grundsätzlich jedoch dem Prinzip der „Wenn-dann-Regeln“.
 - WENN Ereignismuster DANN Aktion
- Event Processing Engine: Auf Basis des Ereignismodells und der Ereignisregeln erfolgt hier schließlich die Verarbeitung der Ereignisse.

Ein EPA umfasst die folgenden Funktionalitäten:

- Transformation ohne Informationserweiterung
 - Filterung
 - Translation (Änderung des Ereignistyps/des Ereignisformats)
 - Aggregation (Zusammenfassung von Ereignissen)
 - Splitting (Zerteilung eines Ereignisses in mehrere Ereignisse)
- Transformation mit Informationserweiterung
 - Content Enrichment (Anreicherung mit Kontextwissen)
 - Abstraktion (Erzeugung von Ereignissen höherer Komplexität)
 - Korrektur

Für die Informationserweiterung nutzt ein EPA z. B. angeschlossene Datenbanksysteme. Die Aufgaben eines EPA werden durch die Regelsätze festgelegt. Ein

kooperierendes Netzwerk aus mehreren EPAs wird als *Event Processing Network* (EPN) bezeichnet. EPNs integrieren mehrere EPAs mit wenigen Regeln zu einem Gesamtsystem. Dadurch kann eine Modularisierung und Strukturierung der Ereignisregeln entsprechend fachlicher Gesichtspunkte vorgenommen werden.

Im Kontext der vorliegenden Arbeit besteht das EPN in Anlehnung an SHARON & ETZION (2008) aus vier Komponenten:

- Event-Producer (Ereigniserzeugende Komponenten)
- Event-Consumer (Ereignisverbrauchende Komponenten)
- Event Processing Agents (Ereignisverarbeitende Komponenten)
- Event-Channel (Verbindungselemente)

Der Grundgedanke eines EPN ist die Aufteilung der Ereignisverarbeitung in Teilaufgaben nach dem Prinzip der starken Kohärenz. Ziel ist eine Erhöhung der Skalierbarkeit durch eine mögliche physische Verteilung der Verarbeitung auf verschiedene Server. Dadurch wird eine höhere Transparenz und Wartbarkeit durch leichtgewichtige EPAs mit einer reduzierten Regelanzahl je EPA sowie eine gute Erweiterbarkeit des Systems durch standardisierte Schnittstellen (Event-Channels) erreicht. Die Trennung der Aufgabenbereiche der Verarbeitung kann prioritätsbasiert oder nach fachlichen bzw. inhaltlichen Gesichtspunkten erfolgen.

2.3.3 Knowledge Discovery in Databases

Als Erweiterung der Überwachung von Datenströmen mit bekannten Regeln soll auch ein (semi-)automatischer Lernprozess zur Anpassung und Erweiterung der Regelbasis im Rahmen der Arbeit zum Einsatz kommen. *Knowledge Discovery in Databases* (KDD) ist ein interdisziplinäres Vorgehen zur Extraktion von bisher unbekanntem Wissen aus statischen Datenbanken, das sich an der Schnittstelle von Statistik, maschinellem Lernen und Datenbanksystemen entwickelt hat (FAYYAD ET AL. 1996a, ESTER & SANDER 2000). Die folgende Abbildung 12 zeigt die Schritte des KDD-Prozesses, welcher neben dem Data-Mining die Auswahl der Daten, die Vorverarbeitung und Transformation der Daten sowie schließlich die Interpretation der gefundenen Muster umfasst. (FAYYAD ET AL. 1996a)

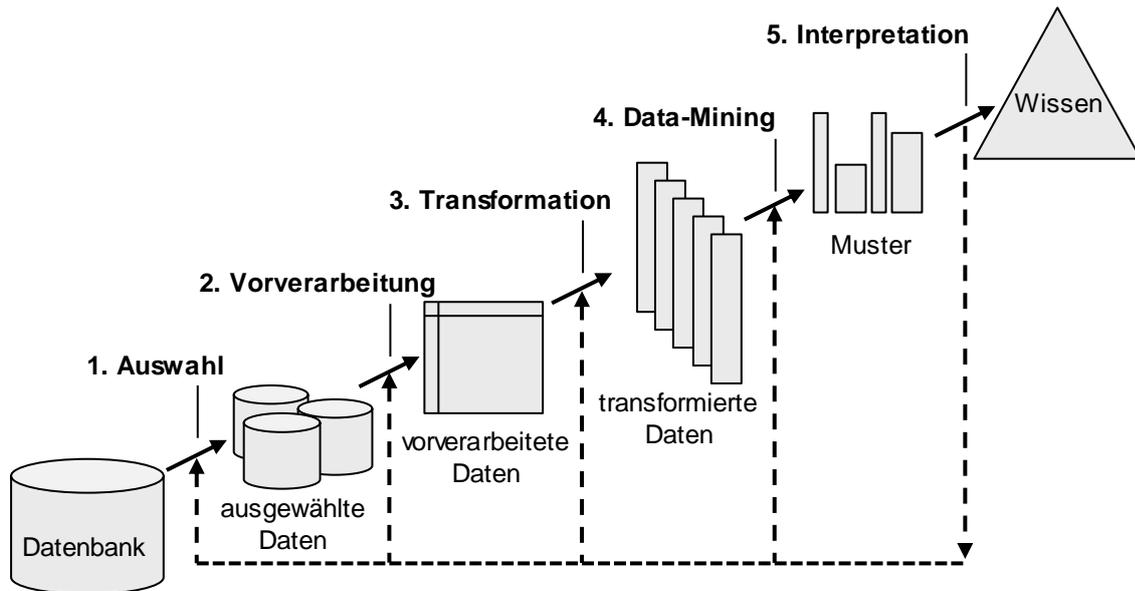


Abbildung 12: Ablauf und Schritte des KDD-Prozesses (FAYYAD ET AL. 1996b)

In diesem Kontext wird der Begriff Data-Mining häufig synonym verwendet. Data-Mining ist hingegen ein Teil des KDD-Prozesses und beschreibt den Schritt der Datenanalyse, der aus einer Datenbasis Muster und Regeln extrahiert. Im Rahmen dieser Arbeit stehen die Data-Mining-Verfahren und die Interpretation der Ergebnisse der Datenanalyse im Fokus. Für die nähere Erläuterung der weiteren Schritte sei auf weiterführende Literatur verwiesen, wie z. B. (ESTER & SANDER 2000, WITTEN & FRANK 2001, BRAMBRING 2017).

Laut FAYYAD ET AL. (1996b) hat „Data-Mining das Ziel, Wissen aus Daten zu extrahieren“. Als Wissen definiert RUNKLER (2015) „interessante Muster, die allgemein gültig sind, nicht trivial, neu, nützlich und verständlich“. In der Literatur existieren unterschiedliche Einteilungen der Methoden des Data-Minings. ALPAR & NIEDEREICHHOLZ (2000) ordnen die *Methoden und Algorithmen* ihren *Aufgaben* zu. Dabei werden, wie in nachfolgender Abbildung 13 dargestellt, fünf Hauptaufgaben unterschieden.

Aufgaben	Methoden
Klassifikation	Entscheidungsbaum
	K-nächster Nachbar
	Fallbasiertes Schließen
	KNN (überwachtes Lernen)
Segmentierung	Clusteranalyse
	KNN (unüberwachtes Lernen)
Prognose	KNN (unüberwachtes Lernen)
	Regression
Abhängigkeitsanalyse	Gerichtete Bayessche Netze
	Assoziationsanalyse
Abweichungsanalyse	Ausreißertest

*Abbildung 13: Aufgaben und Methoden des Data-Mining
in Anlehnung an ALPAR & NIEDEREICHHOLZ (2000)*

Die *Klassifikation* wird durchgeführt, wenn neue Daten in bestehende Gruppen eingeteilt werden sollen. Ziel der Klassifikation ist die Zuordnung eines Objekts entsprechend der Objektmerkmale zu einer vorgegebenen Klasse mit passenden Klasseneigenschaften (DEMANT ET AL. 2011). Die zuordnende Funktion kann in Form von Regeln beschrieben werden. Zu den Methoden, die häufig mit dem Ziel der Klassifikation eingesetzt werden zählen Entscheidungsbäume, k-nächste Nachbarn, fallbasiertes Schließen sowie künstliche neuronale Netze (KNN) (ALPAR & NIEDEREICHHOLZ 2000).

Bei der *Segmentierung* von Daten werden die zu analysierenden Daten in verschiedene Gruppen oder Klassen eingeteilt. Die Klassen sind dabei vor der Analyse nicht bekannt. Eine weitverbreitete Methode der Segmentierung ist das Clustering, daneben können auch KNN hierfür eingesetzt werden. Dabei erfolgt die Partitionierung der Objekte anhand von Ähnlichkeitskriterien in Cluster (Gruppen). Ausreißer sind Objekte, die zu keinem der gefundenen Cluster gehören. (CLEVE & LÄMMEL 2014)

2 Grundlagen

Mittels der *Prognose* sollen unbekannte Merkmalswerte auf Basis anderer Merkmale oder historischer Werte für das gleiche Merkmal vorhergesagt werden. Kontinuierliche quantitative Werte stehen dabei im Fokus der Datenanalyse. Zu Prognosezwecken kommen die Regression sowie Methoden aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz wie z. B. KNN zum Einsatz. Für die Ermittlung diskreter Werte kann hingegen auch die Klassifikation zum Einsatz kommen (ALPAR & NIEDEREICHHOLZ 2000).

Bei der *Abhängigkeitsanalyse* werden Beziehungen zwischen Merkmalen eines Objekts bzw. Vorgangs oder zwischen verschiedenen Objekten gesucht. Es können nicht nur Beziehungen zu einem bestimmten Zeitpunkt untersucht, sondern auch Zeitverläufe analysiert werden. Eine zentrale Methode der Abhängigkeitsanalyse ist die Assoziationsanalyse, seltener kommen gerichtete Bayessche Netze zum Einsatz. Ziel der Assoziationsanalyse ist die Identifikation von Assoziationsregeln. Assoziationsregeln unterscheiden sich von Klassifikationsregeln dadurch, dass sich die Vorhersage nicht auf ein Zielmerkmal beschränkt, sondern auch Zusammenhänge zwischen beliebigen Attributen gesucht werden können (CLEVE & LÄMMEL 2014). Mithilfe der Assoziationsanalyse können Wechselwirkungen und Zusammenhänge zwischen verschiedenen Daten aufgedeckt werden. Ein typischer Anwendungsfall für die Assoziationsanalyse ist die Warenkorbanalyse, womit Erkenntnisse zum Kaufverhalten von Kunden ermittelt werden.

Mittels der *Abweichungsanalyse* sollen Objekte identifiziert werden, die sich nicht den anderen Objekten zuordnen lassen. Gleichzeitig sollen die Ursachen für die Abweichungen ermittelt werden. Ausreißertests sind dabei eine zentrale Methode zur direkten Identifikation von Abweichungen (ALPAR & NIEDEREICHHOLZ 2000).

In der Literatur werden darüber hinaus weitere Aufgabengruppen genannt, wie z. B. die Regressionsanalyse, die sich der Statistik zuordnen lässt oder die Datenzusammenfassung (Summarization), die eine wichtige aber triviale Aufgabe darstellt. Die Aufgaben und ihre Methoden lassen sich jedoch nicht exakt voneinander abgrenzen (FAYYAD ET AL. 1996a). Des Weiteren wird im Bereich Data-Mining zwischen überwachtem und unüberwachtem Lernen unterschieden. Als Lernen wird der Prozess bezeichnet, bei dem ein Data-Mining-Verfahren aus alten Beispieldaten – der sog. Trainingsmenge – Regeln für adäquate Analyseergebnisse von neuen, noch zu untersuchenden Daten extrahiert. Ob die Güte der ermittelten Regeln den Anforderungen entspricht, kann mit einer Teilmenge der Trainingsmenge – der sog. Testmenge – überprüft werden (WITTEN & FRANK 2001). Die Methoden des unüberwachten Lernens unterscheiden sich von den Methoden des

überwachten Lernens darin, dass ohne zusätzliche Informationen Ähnlichkeitsstrukturen in einem vorbereiteten Datensatz entdeckt werden, die dann wiederum auf weitere Datensätze übertragen werden können (FÜRNKRANZ ET AL. 2012). Beim überwachten Lernen lassen sich Verfahrensergebnisse mit historischen Daten vergleichen und solange Verbesserungen durchführen, bis eine akzeptable Fehlerabweichung zwischen den historischen Daten und den Analyseergebnissen besteht (ALPAR & NIEDEREICHHOLZ 2000).

Die in diesem Abschnitt dargestellten Verfahren und Methoden von KDD werden im Rahmen der vorliegenden Dissertation insbesondere für die Mustererkennung und die darauf basierende Gestaltung von Regeln herangezogen.

2.4 Fazit

Basierend auf der in Kapitel 1 dargelegten Ausgangssituation und Problemstellung erfolgte in diesem Kapitel die Vorstellung der relevanten Grundlagen. Zunächst wurden die Grundlagen der PPS, die vielfältige Aufgaben zur Beherrschung der Prozesse und Materialflüsse umfasst, sowie das Zielsystem für die logistische Positionierung erläutert. Vor dem Hintergrund steigender Komplexität, Variantenvielfalt und schwankender Bedarfe wird es zunehmend wichtiger, flexible und schnelle Reaktionen auf Ereignisse im Produktionsprozess zu ermöglichen. Den Entwicklungen der Märkte stehen hingegen auch neue technologische Entwicklungen gegenüber (REINHART & ZÜLKE 2017). Daher rücken vor allem die PPS-Softwaresysteme und die aktuell zur Verfügung stehenden IuK-Technologien in den Fokus. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wurden insbesondere die Eigenschaften ereignisorientierter Systeme sowie deren Potenziale zur Steigerung der Reaktionsfähigkeit im Rahmen der Produktionssteuerung erläutert. Des Weiteren wurden Verfahren und Ansätze für die Wissensextraktion vorgestellt, welche in dieser Arbeit für die Ableitung von Regeln zum Einsatz kommen sollen. Insbesondere wurden hierbei die unterschiedlichen Aufgabenbereiche, Zielsetzungen und Zeithorizonte für die Datenanalyse voneinander abgegrenzt. Die kontinuierliche, echtzeitnahe Überwachung der Daten steht dabei der vergangenheitsbasierten Datenanalyse zur Wissensextraktion gegenüber. In Kapitel 3 folgt aufbauend auf den grundlegenden Ausführungen die Untersuchung des relevanten Stands der Technik und Forschung.

3 Stand der Technik und Forschung

Im folgenden Kapitel wird der für die vorliegende Arbeit relevante Stand der Forschung und Technik erläutert und anhand der in Abschnitt 1.3 formulierten Zielsetzung diskutiert. In Abschnitt 3.1 werden die bestehenden Ansätze zur Modellierung und Strukturierung steuerungsrelevanter Informationen in Hinblick auf den Einsatz zur ereignisorientierten Modellierung analysiert. Anschließend werden in Abschnitt 3.2 Verfahren und Ansätze zur Produktionssteuerung dargestellt und deren Vor- und Nachteile sowie deren Anwendungsbereiche gegenübergestellt, um einen passenden Ansatz für das Ereignismanagement auszuwählen. Insbesondere widmet sich Abschnitt 3.2.3 den Ansätzen der Wissensrepräsentation und -verarbeitung, die eine wesentliche Grundlage für die ereignisbasierte und situationsabhängige Produktionssteuerung bilden (vgl. Abschnitt 3.3). Basierend auf dem Stand der Technik und Forschung erfolgt die Ableitung des Handlungsbedarfs (vgl. Abschnitt 3.4) für den Aufbau des im Rahmen der Arbeit entwickelten Systems.

3.1 Ereignisorientierte Modellierung steuerungsrelevanter Informationen

3.1.1 Allgemeines

Im Bereich der Ereignisorientierung gilt es, für unterschiedliche Ebenen und Zielsetzungen der Datenverarbeitung Modellierungsansätze zu vergleichen und zu analysieren. Für die Konzeption eines ereignisorientierten Systems sind die auftrags- und produktbezogenen Ereignisse für die Kommunikation zwischen den IT-Systemen zu strukturieren und zu modellieren. Darüber hinaus sollen zur Schaffung eines grundlegenden Prozessverständnisses Ansätze für die Modellierung der Geschäfts- und Produktionsprozesse ausgewählt werden, die die Zusammenhänge zwischen den Ereignissen innerhalb der Produktionsabläufe wiedergeben. Schließlich ist auch eine strukturierte Herangehensweise für die Modellierung der Ereignisregeln, die die Grundlage für die Ereignisverarbeitung bilden, erforderlich.

Trotz der zunehmenden Verbreitung der Ereignisorientierung und der CEP-Technologie haben sich für alle der genannten Ebenen weder fachliche (z. B. standardisierte Geschäftsprozess- und Ereignismuster-Notationen) noch technische (z. B.

3 Stand der Technik und Forschung

einheitliche Ereignisabfragesprachen) Standards für die Modellierung etabliert (SPRINGER 2017). Innerhalb der Arbeitsgruppe OMG EMP (Objekt Management Group Event Metamodel and Profile) bestanden im Jahr 2008 Bestrebungen, Standards für die Modellierung zu schaffen. Das Vorhaben wurde jedoch nicht weiterverfolgt, sodass zeitnah keine weitere Standardisierung im Bereich der Modellierung für die Ereignisorientierung zu erwarten ist. (OMG 2008)

Von einer Expertengruppe wurde im Rahmen des Dagstuhl Seminars für Event Processing die Eignung unterschiedlicher bestehender Standards für die Spezifikation und Entwicklung ereignisorientierter Systeme untersucht. Ergebnis der Untersuchung war, dass keine durchgängigen Standards für den Bereich der Ereignisorientierung existieren. Dies erschwert die Etablierung ereignisorientierter Systeme in der Praxis. Die Empfehlung der Experten lautet daher, technische Standards und Standards zur Modellierung und Konzeption im Umfeld der Ereignisorientierung zu schaffen und darüber hinaus branchenspezifische Referenzmodelle auszuarbeiten. (DAGSTUHL PARTICIPANTS 2011)

Das Ergebnis dieser Entwicklungen ist, dass aktuelle unterschiedliche Konzepte für die Modellierung einerseits von Herstellern ereignisorientierter Softwareprodukte und andererseits aus dem wissenschaftlichen Bereich bestehen (SPRINGER 2017). Diese sollen nachfolgend vorgestellt und die bestehenden Defizite, insbesondere für den Bereich der Produktion, dargestellt werden.

3.1.2 Strukturierung von Ereignisdaten

In der Informationstechnik werden Ereignisse als Objekte definiert, die Vorfälle repräsentieren oder protokollieren. Dabei können die Vorfälle real stattfinden oder auch als virtuelle Ereignisse simuliert werden. Eine weitere Unterteilung ist die Einordnung in physikalisch/technische Ereignisse und Anwendungs- und Geschäftsereignisse. Anwendungs- oder Geschäftsereignisse sind im Vergleich zu physikalisch/technischen Ereignissen auf einem höheren Abstraktionslevel anzusiedeln und besitzen zudem meist eine höhere Aussagekraft (LUCKHAM & SCHULTE 2012). Sie werden von Unternehmensanwendungen aufgrund von bestimmten Datenkonstellationen, IT-internen Vorkommnissen oder Eingaben eines menschlichen Benutzers erzeugt.

Physikalische/technische Ereignisse stammen von Sensorelementen sowie Maschinen und Anlagen auf der Fertigungsebene. Sie werden hochfrequent und in

großer Menge erzeugt. Die fachliche Bedeutung dieser Ereignisse hat für sich allein gesehen keinen hohen Stellenwert, sodass sie zueinander in Beziehung gesetzt und korreliert werden müssen, um ihre Aussagekraft zu erhöhen.

In der PPS treten verschiedene Typen technischer Ereignisse mit unterschiedlichen Ursachen und Auslösern auf. Weiterhin können unvorhergesehene oder erwartete Ereignisse unterschieden werden. Die erwarteten Ereignisse einer Fertigung sind z. B. logistische Vorgänge und Rückmeldungen zu Beginn und Ende von Arbeitsvorgängen oder zur Verwendung von Betriebsmitteln. Diese Ereignisse sind durch die Planung zeitlich vorherbestimmt und lösen weitere betriebliche Vorgänge aus. Unvorhergesehene Ereignisse bei der Auftragsabwicklung, wie z. B. Eilaufträge, Maschinenausfälle oder fehlende Betriebsmittel, wirken sich meist störend in Form von Unterbrechungen und Verzögerungen auf die Produktionsabläufe aus (SCHWARTZ 2004).

Nachfolgend wird zunächst auf die Strukturierung von Informationen und die darauf basierende Gestaltung von Ereignissen eingegangen. Eine standardisierte Definition der Ereignisse ist dabei Grundlage für die Ereignisverarbeitung und -analyse. *Electronic Product Code Information Services (EPCIS)*-Ereignisse sind ein von Global Standards One (GS1) entwickelter Standard zur Schnittstellenspezifikation (GS1-STANDARD 2007). Dieser ermöglicht eine durchgängige Prozessüberwachung durch ein standardisiertes elektronisches Verzeichnis für den effizienten Zugriff auf Ereignisdaten. Im Rahmen des EPCIS sind, wie in Abbildung 14 dargestellt, vier unterschiedliche Ereignistypen definiert, um unterschiedliche Anwendungsfälle entlang der Wertschöpfungskette abbilden zu können.



Abbildung 14: Ereignistypen der EPCIS in Anlehnung an ISO 19987

Jedes EPCIS-Event umfasst Informationen zum Objekt („was“), die Zeit („wann“), den Ort („wo“) sowie den Geschäftskontext („warum“). Zur eindeutigen Identifikation von Objekten existieren Standards für die Strukturierung der Identifikationsnummer, so vergibt die GS1 beispielsweise den Electronic Product Code (EPC). Das Objektereignis dient der reinen Erfassung von Objekten. Das Aggregationsereignis wird bei der physikalischen Aggregation von Objekten genutzt, etwa bei der Zuordnung einzelner Objekte (z. B. Behälter) zu einer Einheit (z. B.

3 Stand der Technik und Forschung

Gitterbox). Das Transformationsevent bezieht sich auf Prozesse, bei denen die Verarbeitung oder Montage einzelner Baugruppen zu einer neuen funktionalen Einheit führt. Das Transaktionsevent gibt die Verknüpfung oder Trennung eines physikalischen Objekts mit einer Transaktion (z. B. Produktionsauftrag) an. (GS1-STANDARD 2012)

Das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „RAN“ (RFID-based Automotive Network) beschäftigte sich mit der echtzeitnahen Generierung und Bereitstellung von auftragsbezogenen Informationen entlang der Wertschöpfungskette. Im Fokus stand die Strukturierung steuerungsrelevanter Informationen von Produkten, die mit einem RFID-Transponder ausgestattet sind. Die Produkte werden dabei über die eindeutige Objekt-ID auf dem Transponder identifiziert und mit ablaufbezogenen Informationen (z. B. aktuell abgeschlossener Arbeitsschritt) verknüpft. Die Modellierung des RFID-Leseereignisses erfolgt auf Basis des EPCIS-Standards. ENGELHARDT (2015) erweitert in seiner Arbeit, die im Kontext des Projekts RAN entstanden ist, zudem das EPCIS-Ereignismodell um prozessuale produktspezifischen Informationen („wie“ – z. B. Qualitätsdaten), damit diese Informationen für die situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage genutzt werden können. Ansätze aus RAN wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „CyProS (Cyber-Physische Produktionssysteme) – Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik“ weiterentwickelt.

Die im Rahmen der beiden Projekte ProSense (Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik) und CyProS initiierte *DIN SPEC 91329* „Erweiterung des EPCIS-Ereignismodells um aggregierte Produktionsereignisse zur Anwendung in betrieblichen Informationssystemen“ umfasst das Thema der Modellierung von Ereignissen. In der Spezifikation wird der EPCIS-Standard um Sensorikdaten erweitert und darauf aufbauend eine Kommunikationsarchitektur für eine ereignisbasierte PPS aufgezeigt.

3.1.3 Modellierung von strukturellen Ereignisarchitekturen

BRUNS & DUNKEL (2010) erläutern den Einsatz von ereignisorientierten Architekturen am Beispiel eines Verkehrsmanagements. Sie schlagen eine Event-driven Architecture (EDA)-Referenzarchitektur zur Analyse und Verarbeitung von Ereignissen in Echtzeit vor. Grundlage für die Architektur ist ein mittels Unified Modelling Language (UML)-Notation erstelltes Ereignismodell. Für die Definition

von Beschränkungen und die Präzisierung des Ereignismodells nutzen die Autoren die Objekt Constraint Language (OCL). Aufgrund der Analogie zwischen Objektklassen und Ereignistypen eignet sich die UML für die Spezifikation des strukturellen Ereignismodells. Die UML ist eine grafische Modellierungssprache, die zur Visualisierung, Spezifikation, Konstruktion und Dokumentation der Elemente von Softwaresystemen dient. Seit 1997 ist die UML eine von der Object Management Group (OMG) standardisierte Notation zur Darstellung und Analyse von objektorientierten Systemen. Die aktuelle Version der UML 2.5 umfasst insgesamt 14 Diagrammarten, die in zwei Hauptgruppen – Struktur- und Verhaltensdiagramme – untergliedert werden (OMG 2017). Ein Ereignistyp kann als Objektklasse mit entsprechenden Attributen, Referenzen und Hierarchien aufgefasst werden, weshalb sich UML-Klassendiagramme zur Darstellung von strukturellen Ereignismodellen eignen. UML-Klassendiagramme beinhalten die statischen Strukturbestandteile eines Systems mit seinen Eigenschaften und Beziehungen und zählen zu den Strukturdiagrammen der UML. Da mittels der UML für die meisten praktischen Anwendungsfälle aussagekräftige Ereignismodelle erstellt werden können, wird im Rahmen dieser Arbeit die UML-Notation für die Modellierung des strukturellen Ereignismodells verwendet. In Kapitel 6.3.2 erfolgt die Gestaltung des strukturellen Ereignismodells aus diesem Grund in Form eines UML-Klassendiagramms in Anlehnung an das von BRUNS & DUNKEL (2010) vorgestellte Ereignismodell.

KROPP (2016) entwickelte im Rahmen seiner Arbeit ein Ereignismodell als Grundlage für die Produktionsregelung. Ziel der Arbeit war die Definition von Ereignistypen auf einer unteren Aggregationsebene zur Verfolgung des physischen Fertigungsauftrags. Die für die Regelung relevanten Daten sind in den Attributen der Ereignistypen hinterlegt. Die Teilmodelle der Regelgrößen und der Ereignistypen wurden zu einem Ereignismodell konsolidiert, in dem die Interdependenzen zwischen den einzelnen Ereignistypen in Form von Regeln dargestellt werden. Für die Modellierung des Ereignismodells verwendete der Autor ebenfalls die UML-Notation. (KROPP 2016)

3.1.4 Modellierung von Produktionsprozessen und Ereignisregeln

Neben den Ereignissen und den Ereignistypen müssen auch die Produktionsprozesse modelliert werden. Die relevanten hierarchischen und zeitlichen Beziehungen und Grenzen müssen einerseits benutzerfreundlich beschrieben und andererseits weitgehend standardisiert beschrieben werden, um Regeln und Muster für die

3 Stand der Technik und Forschung

Ereignisverarbeitung abzuleiten. Die transparente und übersichtliche Darstellung komplexer Ereignismuster mittels standardisierter grafischer Geschäftsmodellierungsansätze stellt jedoch eine Herausforderung dar (SPRINGER 2017). Konventionellen Sprachen für die Geschäftsprozessmodellierung, wie die UML, ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK) oder der häufig eingesetzte Business Process Model and Notation (BPMN) Ansatz, mangelt es an der Fähigkeit, komplexe Ereignismuster, wie räumliche, zeitliche oder sequenzielle Beziehungen zwischen einzelnen Ereignissen, auszudrücken (VIDAČKOVIĆ 2014).

Um komplexe Muster in Ereignisströmen zu erkennen, bedarf es nach ETZION & NIBLETT (2010) der Fähigkeit, verschiedene logische, temporale und auch sequenzielle Operationen durchzuführen. Die meisten Modellierungsmethoden erlauben hingegen keine Darstellung zeitlicher Zusammenhänge. Diese ist jedoch für die Modellierung von Produktionsprozessen und die Darstellung der auftretenden Ereignisse grundlegend erforderlich. ETZION & NIBLETT (2010) führten in ihrer Veröffentlichung ein umfassendes Set an Mustern von Ereigniskorrelationen ein. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die von KIM & OUSSENA (2012) identifizierten komplexen Ereignismuster, die auf den Überlegungen von BARROS ET AL. (2007) basieren und Grundlage für die Weiterentwicklung der Kategorisierung von KRUMEICH ET AL. (2016) sind.

Tabelle 1: Komplexe Ereignismuster in Anlehnung an KIM & OUSSENA (2012)

Kategorie	ID	Name	Beispiele
Gemeinsames Auftreten (Co-Occurrence)	C1	Konjunktion	AND
	C2	Disjunktion	OR
	C3	Kardinalität	festе Anzahl, Bereich, Variable
	C4	Ausschluss	NOT
	C5	Sequenz	gefolgt von
Zeitfenster (Time Window)	T1	Zeitraum	innerhalb, währenddessen, vorher, nachher
	T2	Instanz	erster, letzter
	T3	Zeitpunkt	vorher, nachher, um
Datenabhängigkeit	D1	Ereignis	Schlüsseleigenschaften, ID
	D2	Prozess	Parameter
	D3	Umgebung	Kontext

KIM & OUSSENA (2012) gliederten die komplexen Ereignismuster in drei Kategorien, die durch das gemeinsame Auftreten von Ereignissen, das Zeitfenster sowie die Datenabhängigkeit zwischen den Ereignissen unterschieden werden. Den Kategorien sind eine Identifikationsnummer sowie ein Name und konkrete Beispiele zugeordnet. Aufbauend auf den Arbeiten von BARROS ET AL. (2007), KIM & OUSSENA (2012) und KRUMEICH ET AL. (2015) können die charakteristischen Ereigniskorrelationen für komplexe Ereignismuster identifiziert werden. Demnach müssen grafische Notationen für die Geschäftsprozessmodellierung neben dem Erkennen logischer, temporaler und räumlicher Muster auch die Voraussetzungen für das Erkennen von Trend- und Datenmustern bieten.

Für die Modellierung der Zusammenhänge zwischen den Ereignissen kommen zudem Notationen aus dem Bereich der Geschäftsprozessmodellierung infrage. Insbesondere wurden Ansätze, die auf der BPMN 2.0 oder den EPK basieren, entwickelt.

GABRIEL & JANIESCH (2016) entwickelten den Complex Event Processing Model and Notation (CEPMN) Ansatz. Das Metamodell und die grafische Notation basieren auf dem BPMN 2.0-Standard. Der Fokus dieses Ansatzes liegt auf der Realisierung von EPNs und deren automatischer Ableitung.

Da keiner der standardisierten Modellierungsansätze die Anforderungen eines ereignisorientierten Systems erfüllt, entwickelte VIDAČKOVIĆ (2014) den Event Processing Model and Notation (EPMN) Ansatz für die Ereignisverarbeitungsmodellierung. Die Notationselemente des EPMN basieren auf der BPMN 2.0. Darüber hinaus stellte er auch einen Ansatz für die automatische Ableitung von Ereignisregeln aus dem Geschäftsprozessmodell zu einer ausführbaren EPL vor.

KRUMEICH ET AL. (2016) schlugen einen Ansatz vor, um komplexe Ereignismuster in EPK-Modellen zu modellieren und in eine EPL umzuwandeln. Das Metamodell ist ein erweitertes EPK-Modell namens Event Diagram Model (EDM), das eine umfassende Darstellung von Beziehungen zur Ableitung von Mustern ermöglicht. Auf dieser Grundlage wurden eine Modellierungstechnik und eine Notation mit der Architektur integrierter Informationssysteme (ARIS)-Modellierungsmethode entwickelt und in die ARIS Business Process Analysis Plattform integriert. Zudem wurde ein Ansatz vorgeschlagen, um die Modelle automatisch in ausführbare EPL umzuwandeln, indem abstrakte Syntaxbäume als eine Zwischenrepräsentation (IR - Intermediate Representation) verwendet werden. Da die in EDM-Modellen angegebenen Muster nicht so aussagekräftig sind wie herkömmliche EPLs, ist eine

3 Stand der Technik und Forschung

weitere manuelle Eingabe erforderlich. Das Transformationsergebnis muss von CEP-Experten detailliert und ergänzt werden.

Die oben dargestellten Ansätze zeigen, dass es diverse Bestrebungen gibt, Standardmodellierungssprachen, wie BPMN und EPK, um ereignisorientierte Symbole zu erweitern. Durch die große Menge an Modellierungselementen besteht jedoch die Gefahr der Überforderung der Anwender (FREUND & RÜCKER 2014).

Laut RETTER (2011) und SPRINGER (2017) ist aus diesem Grund jene Form der integrierten Modellierung von Geschäftsprozessen und der zumeist komplexen Ereignisregeln nicht sinnvoll und sollte deshalb stets getrennt voneinander erfolgen. Dabei werden Ereignisregeln in Form von Pseudocodes dargestellt. Eine weitere Erkenntnis in diesem Zusammenhang ist, dass eine Beschränkung des Umfangs der Modellierungsnotation auf branchen- und unternehmensspezifische Elemente erfolgen sollte. SPRINGER (2017) entwickelte beispielsweise im Rahmen seiner Arbeit ein Referenzmodell für Echtzeit- und Ereignisorientierung im Kontext von Kreditinstituten. Dieser Erkenntnis entsprechend wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein branchenspezifisches Modell mit Fokus auf den Bereich der ereignisorientierten Produktionssteuerung entworfen. Die relevanten Forschungsarbeiten im Kontext der Modellierung von Ereignisregeln bauen auf der BPMN 2.0 (VIDAČKOVIĆ 2014) oder der EPK-Notation auf (KRUMEICH ET AL. 2016). Ansätze, die auf der BPMN 2.0 basieren, erweitern die Notation um zusätzliche Elemente und werden dadurch zunehmend unübersichtlicher. Im Rahmen des auf der EPK basierenden Ansatzes von KRUMEICH ET AL. (2016) werden alle Ereignismuster durch Anmerkungen auf den Verbindungselementen beschrieben, wodurch die Modellierungssprache ebenso an Übersichtlichkeit verliert. Die EPK eignet sich jedoch grundsätzlich zur detaillierten Modellierung von Produktions- und Logistikprozessen (KRCMAR 2011). Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit in Anlehnung an die Arbeiten von KRUMEICH ET AL. 2016 ein Modellierungsansatz basierend auf der EPK entwickelt.

3.2 Ansätze zum Ereignismanagement

3.2.1 Allgemeines

Für die effiziente Erfüllung der Aufgaben der Produktionssteuerung ist die Aggregation und Verarbeitung der erfassten Daten und die Kommunikation zwischen

den einzelnen Elementen einer Produktion von zentraler Bedeutung. Die relevanten Daten müssen rechtzeitig in der richtigen Menge und Qualität für die Entscheidungsfindung zur Verfügung stehen (JÜNEMANN & BEYER 1998). Mangelnde Datenqualität und fehlende bzw. fehlerhafte Rückmeldedaten bergen das Risiko, dass die logistischen Zielgrößen nicht erreicht werden (BRAMBRING 2017).

In diesem Zusammenhang spielt die Auswahl der passenden Steuerungsstruktur eine entscheidende Rolle. Wie in Abbildung 15 dargestellt, unterscheiden SCHOLZ-REITER & FREITAG (2007) bei den Grundformen der Steuerungsstrukturen auf zwei Ebenen einerseits nach der Art der Entscheidungsfindung (zentral, dezentral oder autonom) und andererseits hinsichtlich des Aufbaus des Steuerungssystems (hierarchisch oder heterarchisch). (SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007)

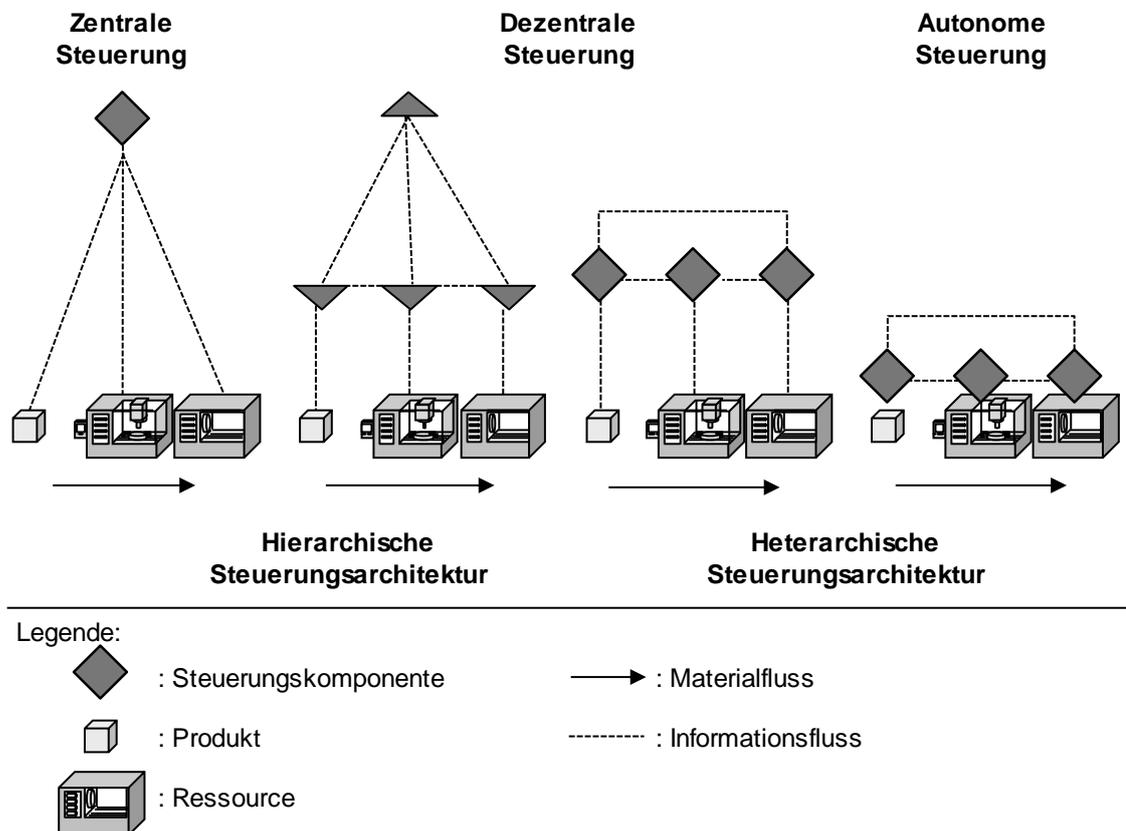


Abbildung 15: Grundformen für Systemstrukturen in der Produktion in Anlehnung an SCHOLZ-REITER & FREITAG (2007) und ENGELHARDT (2015)

Heutzutage ist die Umsetzung der Steuerungsaufgabe lediglich mit geeigneten IT-Systemen realisierbar (BRAMBRING 2017). Daher fällt in diesem Kontext auch häufig der Begriff der Steuerungsarchitekturen. Steuerungsarchitekturen stellen

3 Stand der Technik und Forschung

eine technologieunabhängige Beschreibung einer Steuerung dar und umfassen die Systemstruktur, den Ablauf der Steuerungsentscheidungen, die Art und Anzahl der Entscheidungsträger sowie deren Vernetzung untereinander. Sie geben somit einen Rahmen für die Implementierung der Soft- und Hardware vor (SCHREIBER 2013).

Im Kontext von Industrie 4.0 ermöglichen intelligente Objekte und Cyber-Physische Systeme durch ihre Fähigkeit, selbstständig mit ihrer Umgebung zu kommunizieren und steuerungsrelevante Entscheidungen zu treffen, die Umsetzung von dezentralen und autonomen Steuerungsansätzen. Dies bedeutet eine Weiterentwicklung im Vergleich zu den klassischen zentral gesteuerten Produktionssystemen. Mischformen der zentralen und dezentralen Strukturen werden zudem als hybride Steuerungsstrukturen bezeichnet. (OSTGATHE 2012, NIEHUES ET AL. 2017)

Zentrale Steuerungsstrukturen bündeln alle Planungs- und Steuerungsfunktionen in einem zentralen Element (JÜNEMANN & BEYER 1998). Prozessnahe Steuerungselemente übernehmen nur ausführende Funktionen und stehen in einer Master-Slave-Beziehung. Dadurch ist die Umsetzung eines globalen Optimums im Sinne der logistischen Zielerreichung möglich. Zentrale Systeme weisen eine einfache Struktur und einen geringen Koordinationsaufwand auf. Störungen im Leitrechner führen jedoch zu einem Ausfall des gesamten Systems (ARNOLD & FURMANS 2009). Zudem müssen alle relevanten Daten für die Entscheidungsfindung stets an die zentrale Steuerungseinheit rückgemeldet werden. Aufgrund der großen zu verarbeitenden Datenmengen sowie der zeitintensiven Rechenoperationen sind kurzfristige Entscheidungen nicht realisierbar. Zentrale Steuerungsstrukturen können deshalb die Anforderungen, die dynamische Produktionsumgebungen hinsichtlich Reaktionsschnelligkeit und Flexibilität stellen, nicht erfüllen und sind folglich nur bedingt für die Anwendung in diesem Umfeld geeignet. (OSTGATHE 2012, REINHART ET AL. 2013)

Aufgrund der erschwerten Handhabbarkeit von zentralen Systemen und dem stetigen Bedarf nach mehr Flexibilität wurden in der Forschung zunehmend dezentrale Konzepte für die Steuerung entwickelt (KRUMEICH ET AL. 2014). Bei dezentralen Ansätzen werden die Planungs-, Steuerungs- und Ausführungsfunktionen auf autonome miteinander kommunizierende und kooperierende Einheiten im System verteilt. Es bilden sich selbststeuernde Regelkreise aus, wodurch die einzelnen Produktionsbereiche mehr Freiraum für die Entscheidungsfindung erlangen. Aus diesem Grund ergeben sich Vorteile, wie etwa eine geringere Planungskomplexität

und weniger Koordinationsaufwand oder eine höhere Flexibilität und eine höhere Robustheit gegenüber Störungen (OSTGATHE 2012). Beispiele für dezentrale Ansätze sind neben klassischen regelbasierten Steuerungssystemen, z. B. Kanban, sog. Multiagentensysteme (MAS). MAS basieren auf einer Menge von Softwareagenten, die miteinander kommunizieren und kooperieren, um Steuerungsaufgaben zu lösen. Dabei repräsentieren die Softwareagenten autonom agierende Elemente der Produktion (SCHOLZ-REITER & HÖHNS 2006, NIEHEUS ET AL. 2017). MAS wurden für den Einsatz in der PPS im Rahmen zahlreicher Arbeiten vorgestellt und untersucht (vgl. WEISS 1999, MONOSTORI ET AL. 2006, MÖNCH & LARS 2006, ANSORGE 2007, LEITÃO 2009). Die Defizite dieses Ansatzes resultieren aus der vollständig heterarchischen Organisation von MAS. So verfolgen die Agenten Einzelziele und berücksichtigen dabei nicht die Auswirkungen auf das globale Optimum. Aus diesem Grund werden MAS im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt.

Bei hybriden Mischformen mit zentralen und dezentralen Komponenten und einem hierarchischen Aufbau koordinieren übergeordnete Einheiten die dezentralen Einheiten. Dabei kann der Grad an Dezentralisierung variieren. Die Anforderungen hinsichtlich der Rechenleistung der einzelnen dezentralen Komponenten sind geringer, der Aufwand für die Kommunikation ist jedoch höher. Dezentrale hierarchische Steuerungen weisen im Vergleich zu zentralen Steuerungen eine höhere Flexibilität und Verfügbarkeit auf. Gleichzeitig können durch zentrale Komponenten koordinierende Aufgaben übernommen werden und dadurch für das Gesamtsystem bessere Entscheidungen als bei rein dezentralen Systemen getroffen werden. Derartige Steuerungen werden auch als verteilte Steuerungssysteme bezeichnet und sind in der Industrie weit verbreitet (JÜNEMANN & BEYER 1998, TENEROWICZ-WIRTH 2013, OSTGATHE 2012). Die verschiedenen Systeme unterscheiden sich jedoch stark im Grad der Dezentralisierung.

Holonic Manufacturing Systems (HMS) sind ein Vertreter der hybriden Ansätze und bestehen aus mehreren sog. Holonen. Ein Holon ist ein autonomes kooperatives Element, bestehend aus einem physischen und einem informationsverarbeitenden Teil. Jedes Holon ist in der Lage, Entscheidungen zu treffen und zu kommunizieren (CUPEK ET AL. 2016). Im Gegensatz zu Agenten können sich Holone zudem hierarchisch organisieren. Auf diese Weise kombinieren Holone Vorteile von hierarchischen und heterarchischen Systemen (SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007). Als erste Referenzarchitektur für HMS wurde die Product-Resource-Order-Staff-Architecture (PROSA) entwickelt (VAN BRUSSEL ET AL. 1998).

3 Stand der Technik und Forschung

HMS sind den MAS zwar sehr ähnlich, sie unterscheiden sich jedoch dadurch, dass HMS produktionspezifische Entwicklungen zur Realisierung von autonomen Steuerungen sind, während Agentensysteme aus dem Bereich der künstlichen Intelligenz stammen (GIRET & BOTTI 2004). Bei CUPEK ET AL. (2016) werden Holone in Verbindung mit einem MES für die kurzfristige Produktionssteuerung genutzt, wobei hier Holone und Agenten nahezu synonym verwendet werden. Auch GIRET ET AL. (2017) verwenden Agenten und Holone gleichbedeutend und entwickeln intelligente Produktionsprozesse mit autonomen Holonen.

Auf konzeptioneller Ebene sind die HMS ein gängiger Ansatz zur Repräsentation des verteilten und kollaborativen Charakters eines Fertigungssystems. Im Allgemeinen werden Holonen mittels Softwareagenten implementiert und können daher als eine Umsetzung von MAS gesehen werden. Nachteilig an Agenten ist jedoch, dass sie schwer in bestehende Unternehmenssoftware integrierbar sind und eine mangelnde Rekonfigurierbarkeit haben. Die Umsetzungen im Bereich der HMS beschränken sich daher meist auf die Forschung und auf Versuchsumgebungen (LEITÃO & VRBA 2011). Aus diesem Grund rücken für die Umsetzung einer agilen Produktionssteuerung Konzepte zu serviceorientierten Architekturen (SOA) in den Fokus (GARCÍA-DOMÍNGUEZ ET AL. 2013).

Das serviceorientierte Paradigma ist im Bereich der Internettechnologien zur Strukturierung von verteilten IT-Systemen, z. B. in Form von Web-Services, etabliert. Zunehmend werden SOA auch als mögliche Steuerungsarchitektur für industrielle Produktionsumgebungen diskutiert (SCHMIDT ET AL. 2017). So wird im Rahmen der Referenzarchitektur Industrie 4.0 (RAMI 4.0) die Kommunikation der Industrie-4.0-Komponenten nach dem SOA-Prinzip, z. B. über OPC-UA-Basisdienste, beschrieben (VDI/VDE GMA 2015). Vorteile der SOA liegen in der hohen Flexibilität der Kommunikationsarchitektur, welche auf der Kapselung wiederverwendbarer Funktionalität in Services, der losen Kopplung der Softwarekomponenten sowie der standardisierten Kommunikationsschnittstellen basieren (BRUNS & DUNKEL 2010, SCHMIDT ET AL. 2017). Die Kommunikation erfolgt im Rahmen des Server-Client-Konzepts nach dem Request/Reply-Interaktionsmuster. Dies bedeutet, dass Server Dienste anbieten (Dienstanbieter) und ein Client (Dienstnutzer) diese abrufen kann. Teilnehmer einer SOA können, wie in Abbildung 16 dargestellt, somit entweder Dienstanbieter, Dienstnutzer oder Dienstvermittler sein, wobei die dritte Gruppe optional ist (BOBEK ET AL. 2007).

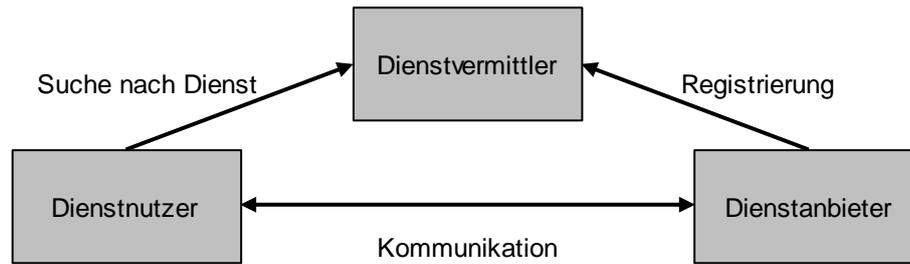


Abbildung 16: Elemente und Interaktion von SOA
in Anlehnung an BOBEK ET AL. (2007)

Der Abruf der Dienste erfolgt je nach Bedarf und auf Anfrage, dadurch wird Flexibilität und Dynamik ermöglicht (FELDHORST & LIBERT 2010). Zudem können die Services in eine Cloud verlagert werden, wodurch beispielsweise unternehmensintern der Aufwand zur Speicherverwaltung reduziert wird (VERL & LECHLER 2014). Ein Vorteil der SOA ist das einfache und verständliche Grundkonzept, das ursprünglich für höhere Ebenen der Unternehmensprozesse entwickelt wurde und dort oftmals Anwendung findet. Weitere positive Aspekte sind die Kapselung der Funktionalität in wiederverwendbaren Entitäten sowie einheitliche Schnittstellen und damit eine hohe Modularität. Dabei sind SOA jedoch bei der Adaptierung für operative Produktions- oder Logistikprozesse nicht notwendigerweise echtzeitfähig, da sie nicht für die Einhaltung von Echtzeitschranken konzipiert sind (FELDHORST & LIBERT 2010).

SOA werden in der Forschung in verschiedenen Kontexten untersucht. Nach DUNKEL ET AL. (2008) sind SOA sehr gut für ablauforientierte Geschäftsprozesse geeignet. Beispiele hierfür sind Transaktionen und synchrone Aufrufe, wie sie bei klassischen Geschäftsprozessen innerhalb von Unternehmen ablaufen. SCHMIDT ET AL. (2017) beschäftigten sich mit einer modellgetriebenen Entwicklung für serviceorientierte Anlagensteuerungen. REINHART ET AL. (2013), KIRSCH ET AL. (2017) und PRESTIFILIPPO (2017) sehen SOA zudem als Schlüsseltechnologie für intelligente Transportsysteme.

3.2.2 Ereignisorientierte Architekturen

Im Zusammenhang mit SOA tritt in der Literatur auch der Begriff der Event-Driven Architecture (EDA) auf. EDA rückt Ereignisse in den Fokus der Betrachtung, da diese das zentrale Strukturierungsobjekt in realen Geschäftsprozessen darstellen. Reale Abläufe werden allgemein durch diverse Ereignisse beeinflusst, daher findet die EDA in unterschiedlichsten Prozessen eines Unternehmens Verwendung. EDA basiert auf der Verarbeitung von Ereignissen zur Kommunikation. Es

3 Stand der Technik und Forschung

handelt sich um eine Architektur ohne zentrale Steuerung, die auf den Umgang mit großen Datenströmen ausgelegt ist. (BRUNS & DUNKEL 2010)

Ereignisbasierte Systeme können auf bestimmte Ereignisse oder Ereigniskonstellationen reagieren und weisen so eine hohe Reaktionsfähigkeit auf. Die Ereignisorientierung als Gestaltungsprinzip von Softwaresystemen in der Produktion bietet das Potenzial, agil, schnell und in Echtzeit zu reagieren. Wesentliche Merkmale solcher Systeme sind die Asynchronität, die Kommunikation an alle Interessenten, die Rechtzeitigkeit, die Expliztheit und das Senden feingranularer sowie komplexer und informationsaggregierter Ereignisse. Ereignisgesteuerte Systeme sind dadurch gekennzeichnet, dass sie Ereignisse erkennen, analysieren und darauf reagieren. Die Kommunikation erfolgt durch den Austausch von Ereignisnachrichten. Dabei können neue Ereignisse erzeugt oder Aktivitäten durch Ereignisse ausgelöst werden. (BRUNS & DUNKEL 2010, BERGER ET AL. 2017)

Grundsätzliche Elemente einer EDA sind *Ereignisquellen*, *Ereignissenken* und *Mediatoren* (siehe Abbildung 17).

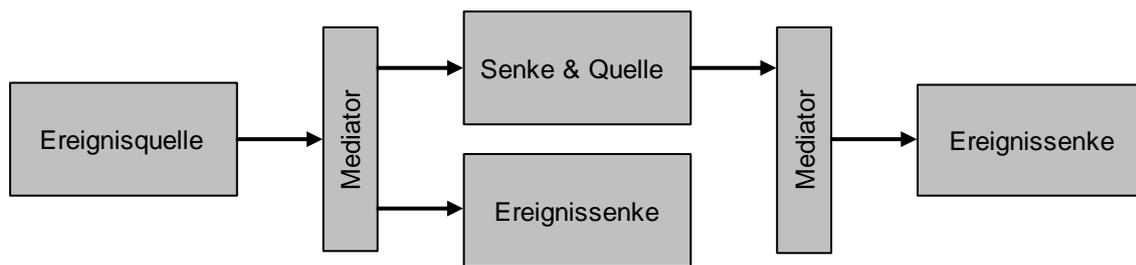


Abbildung 17: Mehrstufiges Modell eines EDA
in Anlehnung an BRUNS & DUNKEL (2010)

Ereignisquellen erkennen auf Basis von Daten Ereignisse und generieren dementsprechend Nachrichten. Diese werden im Anschluss versandt, wobei der Zeitpunkt allein durch die Ereignisquelle bestimmt wird (Push-Prinzip). Die Ereignisquelle verfügt kein Wissen über die Ereignissenke. Ebenso enthält das Ereignis selbst keine Information bzgl. der weiteren Verarbeitung. Mediatoren sind für die Weiterleitung der Nachrichten verantwortlich. Realisiert werden kann ein Mediator z. B. durch eine nachrichtenorientierte Middleware (MOM) mit Publish/Subscribe-Interaktion. Bei diesem Prinzip registrieren sich Ereignissenken bei der MOM und teilen auf diese Weise mit, welche Art von Ereignissen zu ihnen weitergeleitet werden soll (ETZION & NIBLETT 2010). Ereignissenken sind die Softwarekomponenten, die Ereignisse empfangen. Zwischen Ereignisquellen und -senken werden asynchrone Nachrichten ausgetauscht. Dabei wartet die Ereignisquelle nicht auf die Verarbeitung des Ereignisses durch die empfangende Ereignissenke.

Kommunikationsprozesse finden so immer asynchron und nie direkt statt. (OEY 2006, BRUNS & DUNKEL 2010, KARADGI & GRAUER 2014b)

Im Zusammenhang mit EDA tritt häufig auch der Begriff des CEP auf (LUCKHAM 2007). Mithilfe von CEP werden nicht nur einzelne Ereignisse verarbeitet, sondern die Beziehungen zwischen verschiedenen Ereignissen berücksichtigt. Zudem wird mittels CEP eine Filterung und Extraktion von relevanten Ereignissen aus kontinuierlichen Datenströmen ermöglicht (ZHANG ET AL. 2009). EDA versprechen durch die Ereignisorientierung und den geringen Kopplungsgrad der einzelnen Module einige bedeutende Vorteile, die auch für die Produktionssteuerung wichtige Eigenschaften bereitstellen:

- hohe Agilität und Flexibilität,
- schnelle Reaktionsfähigkeit auch bei komplexen Ereignissen,
- Robustheit durch die geringe Abhängigkeit der Bestandteile und
- Echtzeitfähigkeit für eine Aktualität von operativen Entscheidungen.

Nachteile können im undurchsichtigen Kontrollfluss und in der bestehenden Möglichkeit zur redundanten Datenhaltung, die sich aus der Ereignisorientierung ergibt, gesehen werden (BRUNS & DUNKEL 2010).

EDA und SOA werden in der Forschung als komplementäre Konzepte gesehen und daher auch oft unter dem Namen SOA 2.0 kombiniert. Dabei können Services selbstständig auf Ereignisse reagieren (THEORIN ET AL. 2015). Auf diese Weise können die Vorteile beider Einzelansätze verstärkt werden (OEY 2006). Dabei werden in der Forschung verschiedene Geschäftsprozesse betrachtet und meist die Kommunikation fokussiert (vgl. THEORIN ET AL. 2015, 2017). Zum Kontext dieser Arbeit inhaltlich passende EDA finden sich u. a. bei WALZER ET AL. (2008), ZHANG ET AL. (2009) und KASAKOW ET AL. (2016). Bei WALZER ET AL. (2008) wird eine ereignisbasierte Architektur für MES erarbeitet. Hier wird auf ereignisbasierte Simulationen zur Erforschung des Verhaltens gesetzt. KASAKOW ET AL. (2016) entwickeln einen Ansatz zur ereignisbasierten PPS mithilfe einer erweiterter Teileliste. ZHANG ET AL. (2009) erstellten eine ereignisbasierte Plattform für das Management von Produktionsprozessen. EDA bzw. SOA 2.0 werden auch in Kombination mit anderen Ansätzen, wie MAS, erforscht, z. B. bei OMICINI & MARIANI (2013) und KARADGI & GRAUER (2014a). KARADGI & GRAUER (2014a) verwenden eine Kombination von Agenten und Holonen mit EDA, um für autonome Systeme einen bestmöglichen Informationsaustausch sowie reaktive und proaktive Aktionen zu ermöglichen.

METZ (2014) entwickelte im Rahmen seiner Arbeit ein Framework basierend auf EDA und CEP, das die echtzeitnahe Steuerung von Produktionsprozessen ermöglicht und somit zur Verbesserung der Durchlaufzeiten, der Qualität und der Auslastung beiträgt. Seine Arbeit basiert auf den Vorarbeiten von GRAUER ET AL. (2010). Die Umsetzung des Konzepts wurde am Beispiel der Gießereitechnik evaluiert. Der Fokus der Arbeit liegt verstärkt auf der IT-technischen Ausgestaltung und der Implementierung der ereignisorientierten Architektur. Die Ableitung von Regeln sowie die Klassifikation von Maßnahmen für die Produktionssteuerung stehen dabei nicht im Fokus.

Als Basis für die Realisierung einer ereignisorientierten Produktionssteuerung muss im ersten Schritt eine passende Steuerungsarchitektur definiert werden. Die vorgestellten ereignisorientierten Architekturen insbesondere EDA und SOA in Verbindung mit CEP bieten hierfür, wie dargestellt, eine passende Grundlage. Diese werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit daher als Ausgangsbasis für die Steuerungsarchitektur herangezogen und an die Anforderungen zur Steuerung operativer Produktions- und Logistikprozesse angepasst. Darüber hinaus liegt der Fokus jedoch nicht allein auf der IT-technischen Gestaltung der ereignisorientierten Steuerungsarchitektur, sondern auf der weitgehend automatisierten Ermittlung des relevanten Produktionswissens zur Verarbeitung der Ereignisse sowie der Definition und der Priorisierung geeigneter Maßnahmen als Reaktion auf eintretende Ereignisse in der Produktion. Die vorgestellten Ansätze betrachten diese Aspekte nicht ausreichend im Sinne einer ereignisorientierten Produktionssteuerung. Nachfolgend werden daher Ansätze zur Mustererkennung und Regelableitung beleuchtet, die in Kombination mit einer ereignisorientierten Steuerungsarchitektur zu einer echtzeitnahen Entscheidungsunterstützung beitragen sollen.

3.2.3 Ansätze zur Mustererkennung und Wissensrepräsentation

Durch die Einbindung von Wissen soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Entscheidungsunterstützung realisiert werden. Das implizit vorhandene Wissen bzgl. der Produktionsabläufe muss hierfür analysiert und erfasst werden. Ebenso sollen neue unbekannte Muster und Zusammenhänge in den Daten ermittelt werden. Dabei existieren unterschiedliche Arten der Wissensrepräsentation, wie z. B. Entscheidungsbäume, Assoziationsregeln oder neuronale Netze als Wissensspeicher. Ebenso existieren unterschiedliche Ansätze für wissensbasierte Systeme. So kann zwischen fallbasierten und regelbasierten Systemen unterschieden werden. Nachfolgend wird zwischen der Ableitung von allgemeinem Produktionswissen und der Ableitung von CEP-Regeln im Speziellen unterschieden.

Ableitung von Produktionswissen

SELKE (2005) verfolgte im Rahmen seiner Arbeit das Ziel, Strategien und Abläufe der Produktionssteuerung für den automatisierten Aufbau von Simulationsmodellen zu nutzen. Zunächst wurden Modelle zur Beschreibung von Strategien und Abläufen in der Produktionssteuerung erläutert. SELKE (2005) unterscheidet vier Strategiecluster:

- Strategien zur Losgrößengestaltung,
- Strategien zur Ressourcenbelegung,
- Strategien zur Reihenfolgegestaltung und
- Strategien zur Auftragsfreigabe.

Darauf aufbauend wurde als Methode zur Interpretation von Abläufen und Strategien der Produktionssteuerung die Mustererkennung eingeführt. Die Vorgehensweise der Interpretation wird in Abbildung 18 zusammenfassend dargestellt.

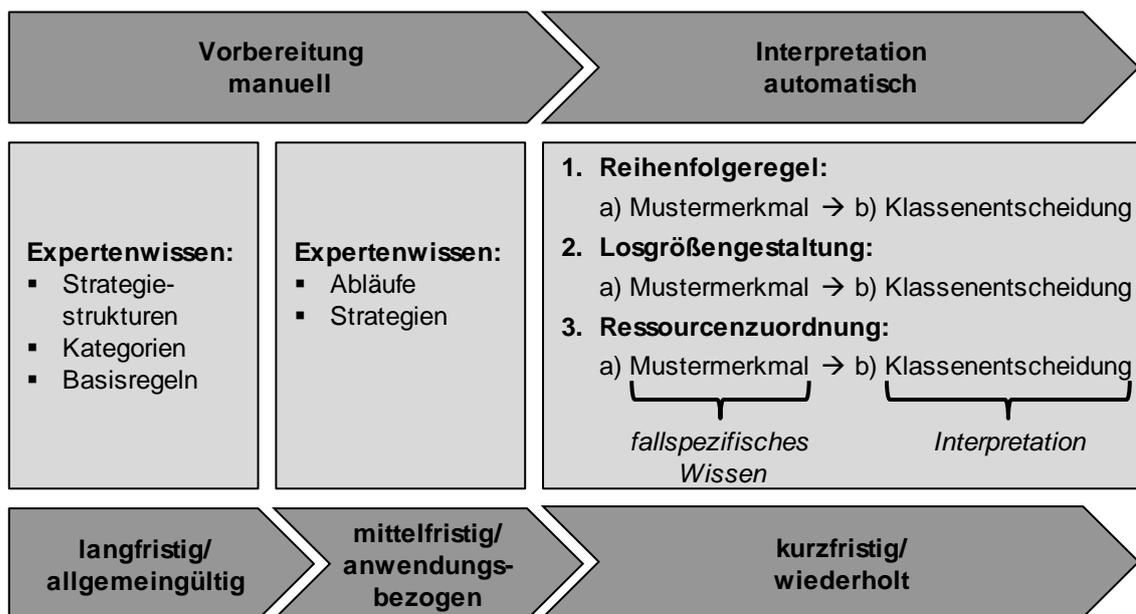


Abbildung 18: Vorgehensmodell zur Interpretation von Strategien und Abläufen der Produktionssteuerung nach SELKE (2005)

Als Datengrundlage für die Mustererkennung dienen die aufgezeichneten Betriebsdaten (BDE). Zur Erkennung des Einsatzes der Produktionssteuerungsstrategien werden für die unterschiedlichen Abläufe charakteristische Eigenschaften definiert und klassifiziert. Schließlich stellte SELKE (2005) ein Vorgehen zur Interpretation von Strategien und Abläufen der Produktionssteuerung vor. Dieses besteht aus einer Vorbereitungs- und einer Interpretationsphase. Im Rahmen der Vor-

3 Stand der Technik und Forschung

bereitungsphase, welche nicht vor jedem Interpretationslauf, sondern nur bei Änderung der Abläufe des Anwendungsfalls durchgeführt werden muss, erfolgt der Wissenserwerb basierend auf Expertenwissen. Die Interpretation ist in drei unabhängige Phasen gegliedert, entsprechend der drei betrachteten Strategiecluster: Reihenfolgeregel, Losgrößengestaltung und Ressourcenzuordnung. Über die Mustermerkmale werden die Abläufe identifiziert und anschließend mittels Klassenentscheidung einer charakterisierten Strategie zugeordnet.

Im Rahmen des DFG geförderten Projekts „Methodik zur Identifizierung und Beschreibung dynamischer Abläufe in der Produktionssteuerung für den Aufbau von Simulationsmodellen“ wurde die von SELKE (2005) entwickelte Methode zur Identifizierung impliziter Strategien weiterverfolgt. Die Einbindung der Strategien in das Simulationsmodell erfolgte manuell und das zur Produktionssteuerung genutzte Simulationsmodell wurde um die in der Realität eingesetzten Steuerungsstrategien erweitert. Darüber hinaus wurden keine weiteren Zusammenhänge aus der realen Produktion (z. B. Mitarbeiterereinsatz) angewendet. (REINHART & GYGER 2009)

GEIGER (2016) entwickelte im Rahmen seiner Arbeit ein System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung für die auftragsbezogene Produktion. Für die Strukturierung der produktspezifischen Auftragsdaten wurden drei Teilmodelle entwickelt: ein Auftragsmodell, ein Ressourcenmodell und ein Produktionsmodell. Zur Erfassung der Betriebsdaten wurden intelligente Produkte unter Verwendung der RFID-Technologie herangezogen. Die wesentliche Zielstellung der Arbeit war die kontinuierliche Aktualisierung der Stammdaten. Das in den Auftragsdaten implizit vorhandene Wissen wurde mithilfe der Clusteranalyse extrahiert und in Form von Regeln und Fällen in das Planungssystem eingebunden. Der Maschinenbelegungsplan wurde durch die Anwendung zweier nicht-optimierender Verfahren erzeugt. Es kam hierfür ein auf Prioritätsregeln basierender Algorithmus in Verbindung mit einem wissensbasierten System zum Einsatz. Es wurde eine höhere Termintreue durch das System erzielt. Das generierte Produktionswissen wurde jedoch nicht für die Produktionssteuerung eingesetzt.

Ableitung von CEP-Regeln

WIDDER (2011) untersuchte die Effektivität der Kombination von CEP-Technologien und Methoden des maschinellen Lernens, um Betrugsaktionen im Online-Banking zu identifizieren. Mit dem Ziel der Betrugserkennung in Echtzeit wurde eine Architektur aus einer CEP-Engine in Verbindung mit den maschinellen Lernverfahren Entscheidungsbaum, Diskriminanzanalyse und neuronales Netzwerk

entwickelt. Mittels simulierter Trainings- und Testevents erreicht das hybride Modell eine Erkennungsgenauigkeit von über 99 % der richtig klassifizierten Transaktionsevents.

MARGARA ET AL. (2014) präsentierten mit iCEP einen Ansatz zur automatisierten Ableitung von Regeln für CEP. Basis für die Regelableitung ist das Erkennen von Spuren (Traces). Positive Spuren liegen vor, wenn das komplexe Ereignis enthalten ist, negative hingegen, wenn dies nicht der Fall ist. Es wurden sieben Module entwickelt, sog. *Learner*, die sich durch die unterschiedlichen Elemente, aus denen eine Ereignisregel bestehen kann, ergeben. So wurde festgestellt, dass die richtigen Auswertefenster und die relevanten Ereignistypen und Attribute gefunden werden müssen, die Auswahl und die Beschränkungen von Parametern zu ermitteln sind sowie Sequenzen erfasst und Aggregations- und Negationsbeziehungen aufgedeckt werden müssen. Durch die Analyse des Datensatzes mithilfe der Learner werden kausale Abhängigkeiten aufgedeckt, welche anschließend die Basis für die Gestaltung der Ereignisregeln bilden. Das Vorgehen wurde am Beispiel der Analyse von Verkehrsdaten vorgestellt.

MOUSHEIMISH ET AL. (2016) entwickelten mit autoCEP einen datengetriebenen Ansatz zur Ableitung von CEP-Regeln. Der Ansatz basiert in der ersten Phase auf dem Erlernen von sog. *Shaplets*. Hierbei liegt der Fokus auf der Klassifikation von Zeitreihen. In der zweiten Phase werden die CEP-Regeln generiert. Der Ansatz ist nicht in der Lage, Daten von unterschiedlichen Quellen zu analysieren. Zudem werden ausschließlich zeitliche Beziehungen analysiert und andere Beziehungen und Abhängigkeiten folglich nicht betrachtet.

3.3 Ansätze zur Steuerung von Produktionsabläufen

3.3.1 Allgemeines

Bezugnehmend auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit werden in diesem Abschnitt zunächst konventionelle und praxisrelevante Steuerungsverfahren für die Produktion erläutert und diskutiert. Darüber hinaus wird der Stand der Forschung und Technik in Bezug auf adaptive Ansätze zur Produktionssteuerung, die auch die aktuelle Situation der Produktion berücksichtigen, dargelegt. Ebenso werden relevante Ansätze zur Entscheidungsunterstützung für den Bereich der Produktionssteuerung vorgestellt. LÖDDING (2016) ordnet der Produktionssteuerung die drei Funktionen *Auftragsfreigabe*, *Reihenfolgebildung* und *Kapazitätssteuerung*

3 Stand der Technik und Forschung

zu. Wobei die Steuerungsverfahren zur Auftragsfreigabe anhand der drei Merkmale *Kriterium der Auftragsfreigabe*, *Detaillierungsgrad* und *Auslösungslogik* klassifiziert werden. Bei der Auslösungslogik wird unterschieden zwischen einer periodischen und einer ereignisorientierten Auftragsfreigabe. Durch die schnellere Reaktion auf Ereignisse werden die für die periodische Auftragserzeugung charakteristischen Verzögerungen und Bestandsschwankungen vermieden. Die Umsetzung der ereignisorientierten Auftragsfreigabe stellt jedoch höhere Anforderungen an die Informationserfassung und -verarbeitung, da die Ereignisse hierfür echtzeitnah erfasst werden müssen. Im Rahmen der Reihenfolgebildung wird derjenige Auftrag in der Warteschlange bestimmt, der als nächstes bearbeitet werden soll. Basierend auf den zu erreichenden logistischen Zielgrößen werden den Aufträgen Prioritäten zugeordnet und diese bzgl. ihrer Dringlichkeit geordnet. Die Reihenfolgebildung hat dadurch einen großen Einfluss auf die logistische Zielgröße der Termintreue. Relevante Verfahren zur Reihenfolgebildung in Bezug auf die Termintreue sind First In - First Out (FIFO), Frühester Plan-Starttermin (FPS), Frühester Plan-Endtermin (FPE) und Schlupfzeit.

Die Kapazitätssteuerung entscheidet über den tatsächlichen Einsatz der zur Verfügung stehenden Kapazitäten. Unternehmen müssen Maßnahmen ergreifen, um die Kapazitäten anzupassen und flexibel zu gestalten und somit die logistischen Zielgrößen zu erfüllen. Einerseits kann hierfür auf die Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter in Form von beispielsweise Überstunden und Zusatzschichten zurückgegriffen werden. Andererseits kann durch die Veränderung der Anzahl der Anlagen und Betriebsmittel oder durch die externe Vergabe von Aufträgen die Kapazität der Anlagen und der Betriebsmittel angepasst werden. Diese Beispiele zeigen, dass sich Maßnahmen aus dem Bereich der Kapazitätssteuerung häufig nur schwer kurzfristig umsetzen lassen und somit für die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit nicht in vollem Umfang relevant sind.

3.3.2 Adaptive Ansätze zur Produktionssteuerung

Nachfolgend werden Arbeiten zu verschiedenen adaptiven Ansätzen zur Produktionssteuerung vorgestellt.

OSTGATHE (2012) entwickelte für die hoch automatisierte Produktion variantenreicher Produktionsprogramme ein System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Dabei wird ein intelligentes Produkt der zweiten Klasse als zusätzliches Steuerungselement in das Produktionssystem integriert. Im Rahmen dieses Systems wurde ein Datenmodell für adaptive Produktionssysteme erstellt, das sämtliche Daten, die zur Steuerung von

Produktionsabläufen relevant sind, strukturiert abbildet (vgl. Abschnitt 4.4.2). Darauf aufbauend entwickelte OSTGATHE (2012) ein wissensbasiertes System zum autonomen Störungsmanagement sowie eine hybride Organisationsstruktur (vgl. Abschnitt 4.3.1), die die Integration des intelligenten Produktes als zusätzliches dezentrales Steuerungselement in der Produktion erlaubt.

Das Projekt CyProS fokussierte die Entwicklung einer einheitlichen Referenzarchitektur, welche eine durchgängige Struktur für eine CPS-basierte Fabrik sowie Strategien und Maßnahmen zur Einführung von CPS in neue und bestehende Fabriken beschreibt. Zudem werden Methoden zur Planung und Steuerung von Cyber-Physischen Produktionssystemen (CPPS) zur Steigerung der Produktivität und Flexibilität produzierender Unternehmen entwickelt. (REINHART ET AL. 2015)

In seiner im Kontext der Projekte RAN und CyPros entstandenen Arbeit stellte ENGELHARDT (2015) eine situationsbasierte Produktionssteuerung für die auftragsbezogene Fertigung und Montage basierend auf RFID-Daten dar. Zur Realisierung einer zeitgemäßen Produktionssteuerung wurden drei zentrale Systemelemente entwickelt. Ziel war die Ermöglichung von situationsbasierten Steuerungsentscheidungen. Die steuerungorientierte Produktionsmodularisierung sowie das RFID-basierte hybride Informationsmanagement in Form einer Referenzarchitektur bilden die Basis des Systems. Kern des Systems sind die drei situationsbasierten Steuerungsverfahren: synchrone zweistufige Auftragsfreigabe, situationsbasierte Reihenfolgebildung mit intermodularer Schlupfzeitverteilung und intramodulare Rückstandsregelung. Der Fokus der Arbeit lag auf der Weiterentwicklung von konventionellen Steuerungsverfahren unter der Nutzung von intelligenten Produkten, die mit RFID-Transpondern ausgestattet sind. Ereignissen werden in diesem Zusammenhang verwaltet, die Steuerungsarchitektur basiert jedoch nicht auf ereignisorientierten Ansätzen im Sinne einer EDA und auch Verfahren zur kontinuierlichen Datenanalyse und Mustererkennung bzw. Regelableitung kommen nicht zum Einsatz.

Neben der Ereignismodellierung befasste sich das Projekt ProSense mit der hochauflösenden, selbstoptimierenden und adaptiven Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik. Der Produktionssteuerer und -planer erhält eine in einer Visualisierungsanwendung aufbereitete Entscheidungsunterstützung auf Basis von Simulationsmodellen. Die automatisierte Erstellung und Aktualisierung der Simulationsmodelle erfolgt anhand von Datenmustern, die mittels Data-Mining-Ansätzen in den hochauflösenden Produktionsdaten ermittelt werden. Die Entscheidungshoheit bleibt dabei stets beim Anwender, vollständig automatisierte Steuerungsentscheidungen werden im Rahmen

3 Stand der Technik und Forschung

des Projekts hingegen nicht betrachtet. Die Datenanalyse erfolgte auf Grundlage historischer Daten und mit dem Ziel der automatischen Generierung von Simulationsmodellen. (SCHUH ET AL. 2015)

NIEHEUS 2016 stellte im Rahmen seiner Arbeit einen Ansatz zur adaptiven Werkstattsteuerung auf Basis der echtzeitnahen Bereitstellung von Betriebsdaten vor. Die echtzeitnahe Steuerung der für die Steuerung relevanten Zeitpunkte, wie z. B. Start und Endzeitpunkt eines Bearbeitungsschritts, erfolgt dabei insbesondere durch die ortungsbasierte Datenerfassung. Der Ansatz umfasst hauptsächlich autonome Abläufe zur Reaktion auf Störungen und bezieht den Mitarbeiter nur in geringem Maße ein. Im Fokus der Arbeit stand die Reihenfolgebildung. Darauf basierend wird die Summe aller reihenfolgeabhängigen Kosten als Zielgröße festgelegt. Eine Störungsklassifizierung dient als Grundlage zur zielgerichteten Einleitung von Reaktionsmaßnahmen. Diese resultieren in vier Maßnahmenkaskaden, die zur Verbesserung des Zielwertes beitragen sollen. Für den Fall, dass durch diese Maßnahmen keine Verbesserung erzielt werden kann, wurde mithilfe des im Rahmen der Arbeit entwickelten Optimierungsalgorithmus eine bessere Reihenfolge der Aufträge ermittelt.

3.3.3 Ansätze zur Entscheidungsunterstützung

Entscheidungsunterstützungssysteme (EUS, engl. Decision Support System (DSS)) sind rechengestützte Systeme, die die Aufgaben haben, Entscheidungsträger in schlecht strukturierten Entscheidungssituationen zu unterstützen. Im Fokus steht dabei nicht die volle Automatisierbarkeit des Entscheidungsprozesses, sondern die Integration des Erfahrungswissens und des Urteilsvermögens der Entscheidungsträger. Dadurch soll zum einen der Entscheidungsprozess an Effektivität gewinnen und zum anderen das schnelle Treffen von Entscheidungen ermöglicht werden (BACK 2002). Im Gegensatz dazu werden beim Investmentbanking zunehmend Handelsentscheidungen automatisch vorgeschlagen und automatisch ausgeführt (Algorithmic Trading). POWER (2002) ordnet DDS in fünf Kategorien – datengetrieben, dokumenten-, modell-, kommunikations- und wissensbasiert – ein, welche in Abbildung 19 dargestellt sind.

3.3 Ansätze zur Steuerung von Produktionsabläufen

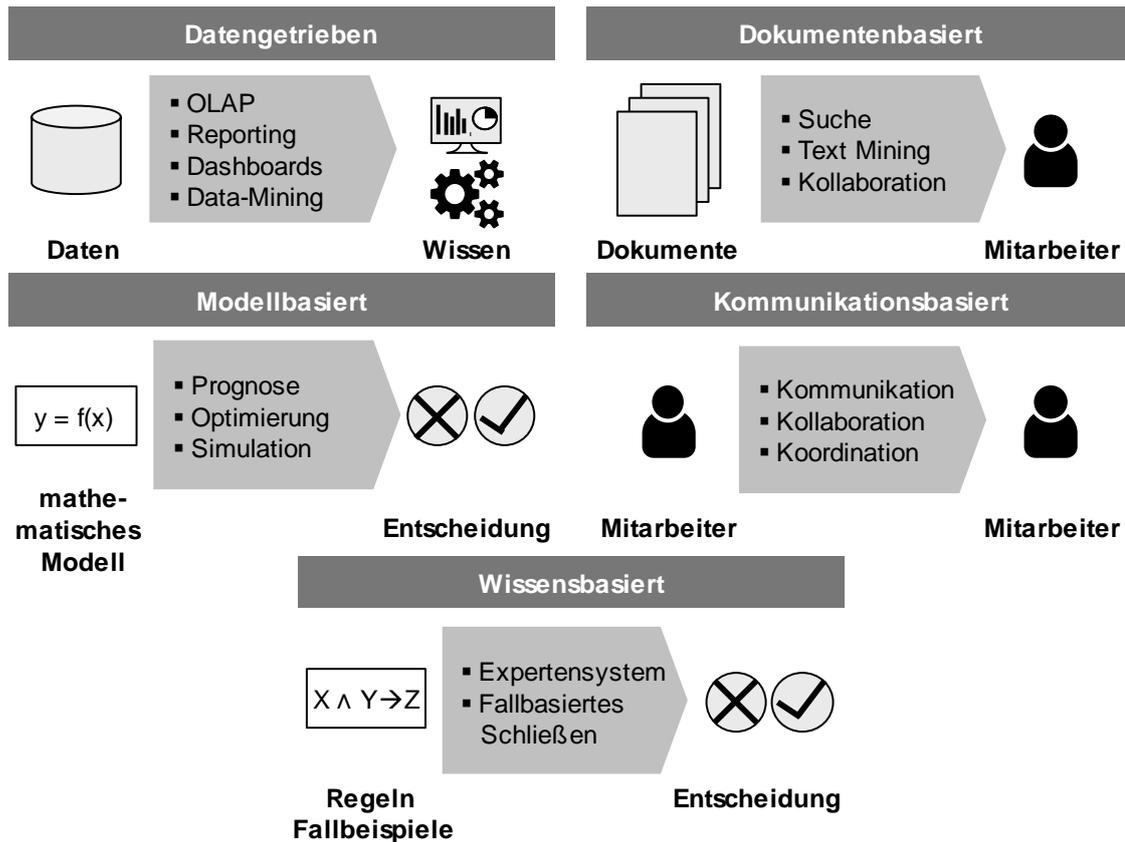


Abbildung 19: Fünf Kategorien von Entscheidungsunterstützungssystemen in Anlehnung an POWER (2002) und LENZ & MÜLLER (2013)

Beim *datengetriebenen Ansatz* liegt der Fokus auf der Analyse und der Darstellung quantitativer Daten. Ausprägungen von datengetriebenen DSS sind für die Datenanalyse das Online Analytical Processing (OLAP) sowie Data-Mining (vgl. Kapitel 2.3.3). Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt im Rahmen des Berichtswesens (Reporting), die der visuellen Aufbereitung in Form von Dashboards bzw. Cockpits (vgl. Kapitel 2.3.1). Unter Online Analytical Processing (OLAP) wird dabei eine Vorgehensweise verstanden, die schnelle und flexible Ad-hoc-Analysen von multidimensionalen Daten für einen breiten Nutzerkreis ermöglicht. (LENZ & MÜLLER 2013)

Dokumentenbasierte Systeme kommen zum Einsatz, um unstrukturierte Daten zu suchen, zu verteilen und zu versionieren. Die Dokumente erhalten eine Struktur, wodurch die Entscheidungsunterstützung realisiert wird. Mittels Text Mining- und Web Mining-Methoden können zudem Muster in den Dokumenten ermittelt werden. (FELSBERGER ET AL. 2016, LENZ & MÜLLER 2013)

3 Stand der Technik und Forschung

Modellbasierte Systeme nutzen mathematische Modelle in Form von beispielsweise Differential-, Fuzzy-, Gleichungs- oder Ungleichungssystemen. Um komplexe Problemstellungen abzubilden, werden Optimierungs-, Simulations- und Prognosesysteme verwendet. Die Modelle stellen eine Vereinfachung der Realität dar und basieren auf Werkzeugen und Methoden aus dem Bereich der Statistik, wie z. B. der analytische Hierarchieprozess (AHP), die Entscheidungsbaumanalyse oder die multikriterielle Entscheidungsanalyse. Ziel ist es, die am besten geeignete Alternative für die aktuell gegebene Situation zu finden (FELSBERGER ET AL. 2016, LENZ & MÜLLER 2013). Für den Bereich der Produktionsplanung und -steuerung und für das Supply-Chain-Management wurden zahlreiche Modelle zur Entscheidungsunterstützung entwickelt und eingesetzt (FELSBERGER ET AL. 2016). Um mithilfe von Simulationen die Auswirkungen von Handlungsoptionen und Alternativen im Rahmen von modellbasierten DSS darzustellen, ist aufgrund der zahlreichen durchzuführenden Experimente ein hoher Aufwand erforderlich.

Kommunikationsbasierte Systeme fokussieren die Kommunikation, Kollaboration und Koordination und erleichtern somit die Abstimmung zwischen Entscheidungsträgern und unterstützen das gemeinsame Arbeiten an einer Aufgabe. Software für Videokonferenzen und zum Management von Gruppendiskussionen und -aussagen fallen in diese Kategorie. (KOPÁČKOVÁ & ŠKROBÁČKOVÁ 2006; LENZ & MÜLLER 2013)

Wissensbasierte DSS haben ihren Ursprung in der künstlichen Intelligenz (KI, engl. Artificial Intelligence (AI)). Bei wissensbasierten DSS werden Ansätze aus den Bereichen AI, Expertensysteme sowie Data-Mining und Kommunikationstechnologien integriert. Dadurch können einerseits die Verarbeitung des Wissens und andererseits eine Interaktion zwischen dem Benutzer (Experten) und dem System erfolgen. Die Systeme basieren auf Wissensmodellen, um von Bestehendem logisch auf neue Folgerungen zu schließen, die der Wissensbasis hinzugefügt werden. Zwei wichtige Vertreter wissensbasierter Systeme sind das regelbasierte Expertensystem und das fallbasierte Schließen. Dabei bezieht sich das fallspezifische Wissen ausschließlich auf Beobachtungen und Analyseergebnissen von einem betrachteten Fall. Beim regelbasierten Wissen handelt es sich hingegen zum einen um bereichsbezogenes Wissen, welches das Anwendungsgebiet der betrachteten Fälle generisch beschreibt, und zum anderen um allgemeines Wissen, wie z. B. Beziehungswissen, Problemlösungsheuristiken und Optimierungsregeln (BEIERLE & KERN-ISBERNER G. 2003, GEIGER 2015). Da im Rahmen der vorliegenden Arbeit unterschiedliche Ansätze zur Ableitung und Speicherung des fachspezifischen Wissens für die Ereignisverarbeitung zum Einsatz kommen (vgl. Abschnitt 7.3),

orientiert sich das zu entwickelnde System an den daten-, wissens- und modellbasierten Ansätze zur Entscheidungsunterstützung. Die kommunikations- und dokumentenbasierten Ansätze spielen eine untergeordnete Rolle im Kontext dieser Arbeit.

SCHWARTZ (2004) entwickelte in seiner Arbeit ein Simulationsmodell, das im Rahmen des Störungsmanagements als Entscheidungsunterstützung dient. Es ermöglicht die Quantifizierung der Auswirkungen von reaktiven und präventiven Maßnahmen anhand von Kennzahlen. Im Rahmen des Modells werden Störungen, wie beispielsweise Maschinenausfälle oder Eilaufträge, in Form von Ereignissen simuliert. Zudem wird bei der Bewertung der unterschiedlichen Strategien der Einfluss auf die Planungsstabilität berücksichtigt, wodurch zweckmäßige Strategien für das Störungsmanagement identifiziert werden können. Auf Basis des simulationsgestützten Vergleichs werden die Potenziale der Strategien aufgezeigt, womit diese folglich als Entscheidungsunterstützung herangezogen werden können. Datenanalyseansätze und die Einbindung dieser Erkenntnisse in die Produktionssteuerung werden im Rahmen der Arbeit nicht näher betrachtet.

Innerhalb des Projekts ProDaMi (Entscheidungsunterstützung im Produktionsumfeld mit Data-Mining-Werkzeugen) wurde ein modulares System von Data-Mining-Werkzeugen (ProDaMi-Suite) zur Generierung von entscheidungsfähigem Wissen entwickelt. Der Fokus des Projekts lag auf der intelligenten Auswertung von Produktions- und Anlagendaten mithilfe von Data-Mining-Ansätzen. Komplexe Zusammenhänge in Produktionsprozessen sollen somit erkannt und Produktionsleiter bei der Diagnose von Wechselwirkungen und Störungen unterstützt werden. Das System trifft dabei keine eigenständigen Entscheidungen. Besondere Betrachtung fanden Anwendungsfälle aus der Prozessindustrie. (BERNARD 2011, BRECHER 2011)

Im Rahmen des Projektes SOPHIE (Synchrone Produktion durch teilautonome Planung und humanzentrierte Entscheidungsunterstützung) wurde das Ziel verfolgt, ein modulares EUS zu entwickeln. Im Vordergrund stand dabei die Verknüpfung der realen Welt mit der digitalen Welt. So sollen Entscheidungsträger durch autonom agierende Agentensysteme entlastet werden, gleichzeitig sollen diese jedoch weiterhin eine wichtige Rolle einnehmen und ihre Intelligenz und Entscheidungsfreiheit einbringen. Entscheidungsträger werden mittels einer Online-Simulation bei planungsrelevanten Fragestellungen zur effizienten Bearbeitung von Aufträgen unterstützt, indem Alternativen validiert und Entscheidungen im Sinne der Unternehmensziele getroffen werden können. Im Fokus stand dabei die In-

tegration von Online-Materialflusssimulationen für die Entscheidungsunterstützung in der PPS und die Umsetzung der hierfür erforderlichen Kopplung der Produktion mit den Produktivsystemen (z. B. MES). (MÜLLER & RIEDEL 2014, BLOCK ET AL. 2017, FESTO LERNZENTRUM 2018)

3.4 Ableitung des resultierenden Handlungsbedarfs

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels wurden die relevanten wissenschaftlichen Ansätze dargelegt und analysiert. Dabei wurde der Fokus auf die Strukturierung und Modellierung der Ereignisse gelegt und bestehende Ansätze zur Datenverarbeitung und Wissensrepräsentation sowie zur adaptiven Produktionssteuerung untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass diverse Forschungsansätze für die ereignisorientierte Produktionssteuerung bestehen, eine durchgängige Methode für eine reaktionsfähige Produktionssteuerung zur effizienten Entscheidungsunterstützung auf Basis produktionsrelevanter Ereignisse fehlt jedoch. Insbesondere ergeben sich für die untersuchten Schwerpunkte die folgenden Schlussfolgerungen:

Transparenz für die Entscheidungsunterstützung

Die aktuellen Randbedingungen des Marktes erfordern zunehmend mehr Flexibilität und Agilität von produzierenden Unternehmen und somit eine zeitgemäße Produktionssteuerung (REINHART & ZÜLKE 2017). Zudem besteht der Wunsch nach einer effizienten Entscheidungsunterstützung auf Basis von Rückmeldedaten in der Produktion (MAYER ET AL. 2016). Konventionelle Verfahren zur Produktionssteuerung weisen dabei eine mangelnde Reaktionsfähigkeit im Hinblick auf produktionsrelevante Ereignisse auf (KROPP 2016). Die Wichtigkeit einer hohen Informationstransparenz und -genauigkeit in der Produktion als Voraussetzung für situationsbezogene Entscheidungen im Rahmen der Produktionssteuerung wurde in zahlreichen Forschungsarbeiten erkannt und analysiert. Adaptive Ansätze zur Produktionssteuerung haben dabei das Potenzial zu einer Verbesserung der logistischen Zielerreichung beizutragen.

Bedarf einer ereignisorientierten Produktionssteuerung

Vor dem Hintergrund einer steigenden Komplexität wird vor allem für produzierende Unternehmen eine Auswertung von im Produktionsprozess aufgenommenen Daten zur besseren Prozessbeherrschung und -effizienz immer wichtiger. Technologien aus dem Bereich *Realtime-Analytics* stehen zur Auswertung eines Stroms von kontinuierlich aufgenommenen Mess- und Prozessdaten bereits zur Verfü-

gung. Für den Einsatz der Technologien muss jedoch die passende Steuerungsarchitektur für produzierende Unternehmen definiert werden. Wie dargestellt, eignet sich hierfür eine ereignisorientierte Architektur in Verbindung mit Services (EDA/SOA). In diesem Zusammenhang soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein durchgängiges System, welches auch die Definition einer Steuerungsarchitektur umfasst, für die ereignisorientierte Produktionssteuerung entwickelt werden.

Einheitliche ereignisorientierte Modellierung von Produktionsabläufen

Für den Bereich der Ereignisorientierung existieren aktuell keine Standards. Insbesondere fehlt eine einheitliche Prozessdarstellung, die sowohl von den Prozessverantwortlichen als auch den IT-Experten interpretiert werden kann. Es wurden daher einige Modellierungsnotationen für ereignisorientierte Systeme, jedoch nicht speziell für die Modellierung produktionsrelevanter Ereignisse, entwickelt. Experten empfehlen, branchenspezifische Referenzmodelle für die Modellierung und Konzeption im Umfeld der Ereignisorientierung zu schaffen. Ziel dieser Arbeit ist daher die Entwicklung eines durchgängigen ereignisorientierten Modellierungsansatzes von der Fertigungsebene bis zur Unternehmensleitebene.

Methode zur automatisierten Regelableitung

Eine Herausforderung für den Einsatz von Technologien zur kontinuierlichen Datenstromauswertung ist die Definition der Regel, die die Grundlage für die Informationsverarbeitung darstellt. Daher besteht der Wunsch nach einer weitgehend automatisierten Regelableitung für CEP-Systeme. Es wurden bereits verschiedenen Forschungsansätze zur automatisierten Regelableitung aus Ereignismodellen entwickelt. Diese weisen jedoch alle eine hohe Komplexität und zahlreiche Konvertierungsstufen auf und werden daher meist nur im Forschungsumfeld eingesetzt. Im Rahmen dieser Arbeit sollen aus diesem Grund alternative Wege für die Regelableitung im Produktionsumfeld aufgezeigt werden. Insbesondere soll der Fokus auf dem Einsatz von Data-Mining-Ansätzen zur Regelableitung, wie z. B. dem Association Rule Learning, liegen. Zudem werden Ansätze aus dem Bereich der mathematischen Optimierung untersucht. Ziel ist es somit, vom impliziten Erfahrungswissen der Mitarbeiter zunehmend unabhängiger zu werden.

Definition und Priorisierung von Maßnahmen zur ereignisbasierten Produktionssteuerung

Es fehlen auch Ansätze, die unter Einbeziehung des Auftretens und der Auswirkung von Ereignissen eine strukturierte Auswahl sowie Einleitung von Maßnahmen im Kontext einer ereignisorientierten Produktionssteuerung erlauben. Im ers-

3 Stand der Technik und Forschung

ten Schritt soll hierfür eine Klassifikation der Ereignisse hinsichtlich ihrer Auswirkung erfolgen, um darauf basierend die erforderliche Reaktionszeit abschätzen zu können und den Grad der Automatisierbarkeit für die Initialisierung der Maßnahmen zu bestimmen. Eine weitere Herausforderung stellt die Priorisierung von Maßnahmen zur Entscheidungsunterstützung dar, um damit die gewünschte Flexibilität, Effizienz und Wandlungsfähigkeit in der Produktion umzusetzen. Hierfür soll das Potenzial, das mit einer zeitlichen Verbesserung des Eintritts der Maßnahme einhergeht, bewertet werden und der Einfluss auf die logistischen Zielgrößen aufgezeigt werden. Schließlich soll für das schrittweise Vorgehen zur Auswahl von Maßnahmen im Rahmen der Arbeit eine Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung entwickelt werden.

Basierend auf den grundlegenden Darstellungen in Kapitel 2 und dem Stand der Technik und Forschung in Kapitel 3 werden nachfolgend die Anforderungen an das zu entwickelnde System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung abgeleitet.

4 Anforderungen an ein System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

4.1 Übersicht

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels werden die Anforderungen, welche sich aus dem aufgezeigten Handlungsbedarf ableiten, an ein System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung definiert. Basierend auf dem Stand der Forschung und Technik wurden in Kapitel 3 Defizite aktueller Ansätze aufgezeigt und der daraus resultierende Handlungsbedarf abgeleitet.

Als konkreter Ansatz wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein System für eine reaktionsschnelle, flexible und adaptive Produktionssteuerung basierend auf Technologien zur kontinuierlichen Datenverarbeitung entwickelt. Die nachfolgenden Anforderungen dienen als Orientierung für die Entwicklung des Systems und dessen abschließender Bewertung. Es werden dabei allgemeine und spezifische Anforderungen an das System unterschieden.

4.2 Allgemeine Anforderungen

Bei der Entwicklung eines Systems sind in Anlehnung an LINDEMANN (2007) allgemeine Anforderungen zu beachten, welche für die praktische Anwendung unabhängig von der speziellen Zielsetzung Gültigkeit besitzen. Diese sind im Folgenden aufgelistet und beschrieben.

Übertragbarkeit und Skalierbarkeit

Das System und die zu entwickelnde Methode sollen durch einen hohen Grad an Allgemeingültigkeit auf verschiedene Anwendungen übertragbar sein und dadurch für die ereignisorientierte Steuerung von Produktionsprozessen in diversen Branchen genutzt werden können. Eine generische Gestaltung stellt die Anwendbarkeit für unterschiedliche Produktionsprozesse und intralogistische Abläufe sicher. Die Steuerungsarchitektur muss eine Übertragbarkeit auf andere Systeme zulassen. Die zu entwickelnde ereignisorientierte Produktionssteuerung soll unabhängig von der konkreten Implementierung in einem einzelnen Informationssystem sein. Für die Beschreibung der Architektur und der damit zusammenhängenden Datenstrukturen ist eine angemessene, allgemeine Beschreibungsebene zu wählen. Zudem

4 Anforderungen an ein System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

müssen das System und die dazugehörige Architektur skalierbar sein, um sich an verändernde Datenmengen und -volumina anpassen zu können.

Transparenz

Für die geforderte Übertragbarkeit und den Einsatz in der industriellen Praxis ist die Transparenz des Systems unabdingbar. Das Vorgehen innerhalb der Methode kann nur dann auf andere Anwendungsfälle übertragen werden, wenn der Aufbau und der Zusammenhang der einzelnen Methoden ersichtlich sind. Die Akzeptanz des Gesamtsystems sowie der Vorgehensweise bei Entscheidern und Anwendern wird durch eine hohe Verständlichkeit sichergestellt.

Präskriptiver Charakter

Die Methode soll zielorientierte Vorschriften für die operative Lösung einer Aufgabenstellung beschreiben. Durch die Vorgabe der Abfolge der durchzuführenden Tätigkeiten sowie die Beschreibung der Art und Weise der Durchführung der Tätigkeiten stellen Methoden einen Formalismus für die Durchführung bestimmter Schritte dar.

4.3 Spezifische Anforderungen

Die nachfolgenden Anforderungen sind spezifische Anforderungen an das zu entwickelnde System im Hinblick auf die Produktionssteuerung und die Gestaltung ereignisorientierter Systeme, welche sich durch die Verallgemeinerung von Beobachtungen aus industrienahen Forschungsprojekten in Ergänzung mit aktuellen Erkenntnissen aus dem Stand der Forschung und Technik ableiten.

Reaktionsfähigkeit der Steuerung auf Ereignisse

Die Kernaufgabe einer Produktionssteuerung liegt in der Umsetzung des geplanten Produktionsprogramms trotz unvermeidlicher Störungen. Die Auswirkungen der auftretenden Ereignisse können dabei die Erfüllung der logistischen Ziele negativ beeinflussen. Aus diesem Grund muss die Produktionssteuerung befähigt werden, den aktuellen Zustand der Produktion zeitnah zu ermitteln, Abweichungen zu identifizieren und korrigierende Maßnahmen einzuleiten. Dieses Vorgehen entspricht den grundlegenden Schritten eines ereignisorientierten Systems: erkennen, verarbeiten, reagieren. In diesem Zusammenhang ist eine wichtige Anforderung an ereignisorientierte Systeme die unmittelbare Verarbeitung von Daten. Diese wird unter dem Begriff Echtzeitfähigkeit zusammengefasst. *Echtzeit* steht dabei explizit nicht für eine möglichst kurze Periode. Laut DIN 44300-1 wird Echtzeit wie folgt

definiert: „Unter Echtzeit versteht man den Betrieb eines Rechensystems, bei dem Programme zur Verarbeitung anfallender Daten ständig betriebsbereit sind, derart, dass die Verarbeitungsergebnisse innerhalb einer vorgegebenen Zeitspanne verfügbar sind. Die Daten können je nach Anwendungsfall nach einer zeitlich zufälligen Verteilung oder zu vorherbestimmten Zeitpunkten anfallen.“ Anhand dieser Definition wird ersichtlich, dass es nicht entscheidend ist, ob ein Prozess möglichst schnell seine Ergebnisse liefert. Entscheidend ist, dass innerhalb einer prozessabhängig definierten Zeitspanne die richtigen Werte zur Verfügung stehen. Eine genaue Bestimmung der Zeitspanne hängt vom betrachteten Prozess ab und kann daher auf keinen bestimmten Wert festgelegt werden.

Integrationsfähigkeit in bestehende Systemlandschaft

Die Einsatzfähigkeit des zu entwickelnden Systems ist im Sinne einer durchgängigen horizontalen und vertikalen Integration in bestehende IT-Strukturen von Unternehmen zu gewährleisten. Hierfür sind einerseits der Einsatz von standardisierten Daten und Datenstrukturen und andererseits das Vorsehen entsprechender Schnittstellen und Steuerungsarchitekturen erforderlich.

Weitgehende Automatisierbarkeit aller Systembereiche

Eine weitgehende Automatisierbarkeit des Vorgehens und aller Stufen des Ereignismanagements von der Einführung und Initialisierung bis hin zum Betrieb des Systems, z. B. die Ereignisregelverwaltung, ist im Sinne eines aufwandsarmen Einsatzes des Systems erstrebenswert. Zugleich muss eine nutzerorientierte Entscheidungsunterstützung gewährt werden, sodass die Entscheidungsfindung transparent und nachvollziehbar gestaltet ist und die Akzeptanz bezüglich des Systems sichergestellt werden kann. Die Möglichkeit, in Echtzeit Daten zu analysieren und darauf basierend zeitnah automatisiert oder halbautomatisiert Aktionen zu initiieren oder Entscheidungen abzuleiten, ist eine Anforderung, ebenso wie die weitgehende Automatisierbarkeit der Regelleitung. Auch wenn der Input von Experten hierbei weiterhin erforderlich sein wird, soll es dennoch ermöglicht werden, implizites Wissen automatisiert zu erfassen, zu speichern und für die Produktionssteuerung einzusetzen.

Ganzheitliche Erfüllung der logistischen Zielgrößen

Das Zielsystem der ereignisorientierten Produktionssteuerung soll sich am logistischen Zielsystem orientieren. Logistische Zielgrößen, allen voran die Termintreue, nehmen nach heutigem Stand oftmals einen hohen Stellenwert ein, weshalb diese Ziele in Form von Kennzahlen auch in der ereignisorientierten Produktionssteuerung zu berücksichtigen sind.

4 Anforderungen an ein System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

In Tabelle 2 sind die auf Basis der Erkenntnisse aus dem Stand der Technik und Forschung sowie aus Beobachtungen von anwendungsnahen Forschungsprojekten definierten allgemeinen und spezifischen Anforderungen an ein System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung zusammenfassend dargestellt.

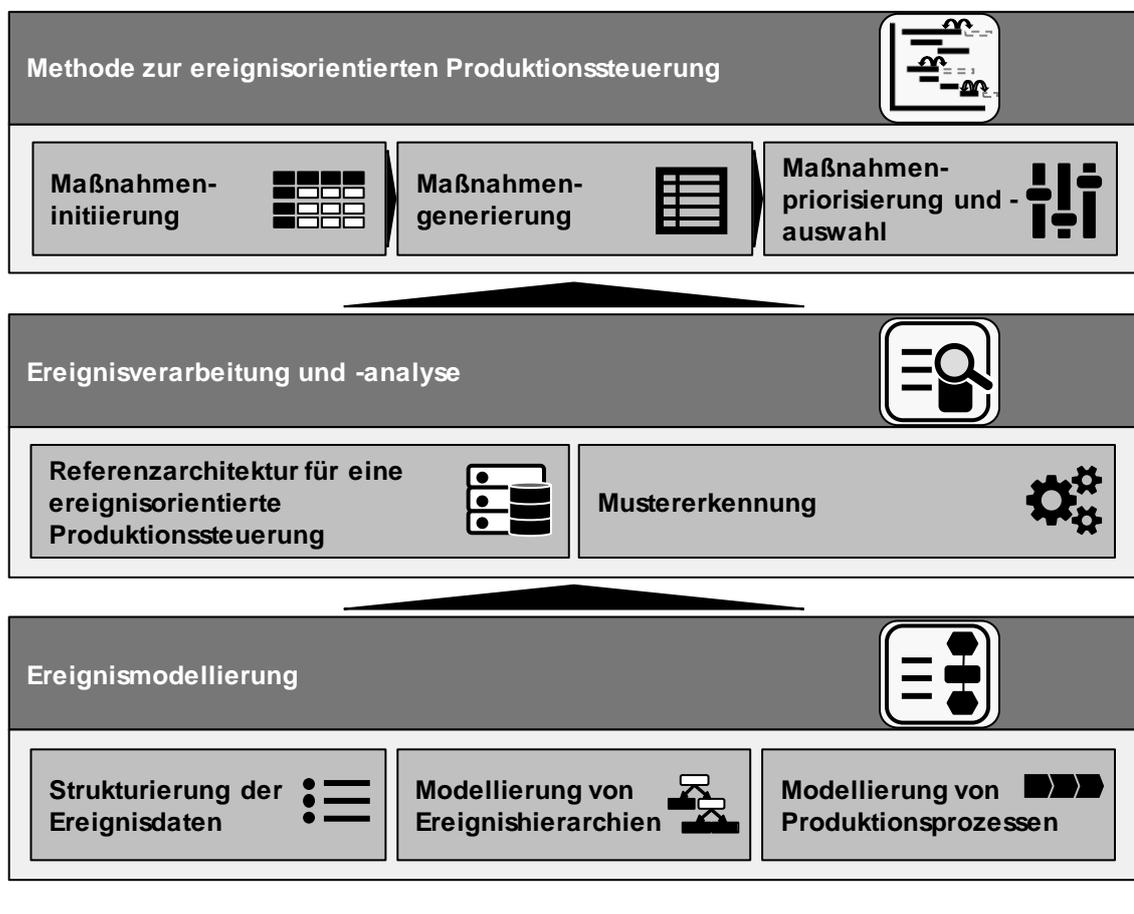
*Tabelle 2: Anforderungen an ein System zur ereignisorientierten
Produktionssteuerung*

Allgemeine Anforderungen	Spezifische Anforderungen
Übertragbarkeit und Skalierbarkeit	Reaktionsfähigkeit der Steuerung auf Ereignisse
Transparenz	Integrationsfähigkeit in bestehende Systemlandschaften
Präskriptiver Charakter	Automatisierbarkeit der Systembereiche
	Ganzheitliche Erfüllung der logistischen Zielgrößen

5 System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

5.1 Übersicht

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels werden das System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung und die einzelnen Systemelemente, die nachfolgend in den Kapiteln 6, 7 und 8 detailliert beschrieben werden, dargestellt. Die nachfolgende Abbildung 20 zeigt die Elemente und die Funktionen des Systems.



Legende:

-  : Element des Systems zur Produktionssteuerung
-  : Funktion des Systems zur Produktionssteuerung
-  : Informationsfluss

Abbildung 20: Überblick über das System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

5 System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Ausgehend von der in Abschnitt 1.1 erläuterten Ausgangssituation sowie dem identifizierten Handlungsbedarf (vgl. Abschnitt 3.4) verfolgt das System das Ziel, eine ereignisbasierte Produktionssteuerung mittels Methoden zur kontinuierlichen Datenverarbeitung zu realisieren und dadurch eine Entscheidungsunterstützung und Verbesserung der logistischen Zielerreichung zu ermöglichen. Die hierfür erforderlichen Elemente des Systems sind *Ereignismodellierung*, *Ereignisverarbeitung* und *-analyse* sowie die *Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung*. Grundlage ist zunächst die Ereignismodellierung, darauf aufbauend folgt die Ereignisverarbeitung und -analyse. Die Ergebnisse dieser Elemente fließen in die Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung ein. Das System und die einzelnen Elemente sollen dabei helfen, die im Rahmen des Stands der Technik und Forschung dargelegten Defizite zu überwinden und den Themenkomplex der Echtzeit- und Ereignisorientierung im Kontext der Produktion zu diskutieren und somit eine weitere Verbreitung ermöglichen.

5.2 Systemelemente

In den nachfolgenden Abschnitten werden die einzelnen Elemente des Systems für die ereignisorientierte Produktionssteuerung kurz dargestellt. Eine ausführliche Beschreibung findet sich in den nachfolgenden Kapiteln.

Die *Ereignismodellierung* stellt die informationstechnische Grundlage für die Umsetzung der ereignisorientierten Produktionssteuerung dar. Dabei gilt es, verschiedene Aspekte der Modellierung zu berücksichtigen. Zunächst ist die Strukturierung der Ereignisdaten eine wichtige Voraussetzung für die Kommunikation innerhalb ereignisorientierter Systeme. Darüber hinaus müssen auch die strukturellen Eigenschaften zwischen den Ereignissen spezifiziert werden. Analog zur Objektorientierung – mit Klassen und Objekten – wird auch in der Ereignisorientierung zwischen Ereignistypen und Ereignisinstanzen differenziert. Mithilfe eines strukturellen Ereignismodells werden daher die Ereignistypen inklusive ihrer Beziehungen und hierarchischen Abhängigkeiten zueinander definiert. Strukturelle Ereignismodelle sind meist statisch und nur in geringem Maße von Änderungen betroffen. Die für die Ereignisverarbeitung zentralen Regeln unterliegen hingegen regelmäßigen Änderungen. Die Regeln umfassen das erforderliche Wissen bzgl. der Ereignisverarbeitung. Für die Darstellung der Verarbeitungslogik ist es erforderlich, die betrachteten Produktionsprozesse zu modellieren und somit die zeitli-

chen, kausalen oder örtlichen Beziehungen und Einschränkungen der steuerungsrelevanten Ereignisse darzustellen. Hier gilt es, neben den physikalischen und technischen Ereignissen, welche von Sensoren erzeugt werden, auch die fachlichen und geschäftsorientierten Ereignisse zu berücksichtigen. Dies ist besonders wichtig, um ein gemeinsames Verständnis zwischen den Fach- und IT-Experten zu fördern. Dadurch können aus dem Modell Regeln für die Ereignisverarbeitung abgeleitet werden. Um die relevanten Zusammenhänge durchgängig von der Fertigungsebene bis zur Unternehmensleitebene darzustellen, wird ein geeigneter Ansatz mit ereignisorientierten Modellierungsnotationen zur Modellierung der Ereignisse für die Produktionssteuerung erarbeitet.

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Erkennen von Zusammenhängen zwischen Ereignissen, die im Produktionsprozess auftreten. Aus diesem Grund widmet sich das Systemelement *Ereignisverarbeitung und -analyse* der Entwicklung einer ereignisorientierten Steuerungsarchitektur für die PPS und der Analyse der Daten, um neue Regeln abzuleiten und somit das System ständig zu verbessern. Ein aktuelles Hemmnis für den Einsatz ereignisorientierter Systeme im Produktionsbereich stellt die expertenbasierte Definition von Regeln für die Ereignisverarbeitung dar. Es werden daher alternative Ansätze, wie das Data-Mining, für den Einsatz zur Regelableitung im Produktionsumfeld angepasst und darauf basierend ein Vorgehen für die Regelableitung in Abhängigkeit der Eigenschaften des zu untersuchenden Produktionsbereichs entwickelt. Eine wesentliche Rolle spielen dabei die Rahmenbedingungen des Produktionsprozesses und die Datenverfügbarkeit.

Das zentrale Systemelement des Steuerungssystems ist die *Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung*, die auf den Ansätzen zur Ereignismodellierung, -verarbeitung und -analyse aufbaut. Die Methode umfasst die Klassifikation der Ursachen und Auswirkungen der Ereignisse sowie die Definition und Priorisierung von Maßnahmen für die Produktionssteuerung. Die wesentlichen Parameter für die Methode sind dabei die zu erfüllenden Kennzahlen und deren Gewichtung, um die operativen logistischen Ziele umzusetzen. In Abhängigkeit der erforderlichen Reaktionszeiten für die Aufgaben der Produktionssteuerung gilt es zudem, ein Konzept für die Skalierbarkeit des ereignisorientierten Systems sowie den Grad der Automatisierbarkeit für die Initiierung und Durchführung der Maßnahmen zu entwickeln.

6 Ereignismodellierung

6.1 Allgemeines

Für den Aufbau eines ereignisorientierten Systems stellt die Modellierung der Ereignisse die Basis für die weitere Definition, die Umsetzung und den Betrieb des Systems dar. Für die Modellierung gilt es dabei jedoch, unterschiedliche Aspekte und Zielsetzungen zu berücksichtigen. Aus diesem Grund ist die Modellierung nachfolgend in drei Bereiche, die *Strukturierung der Ereignisdaten*, die *Modellierung von Ereignishierarchien* und die *Modellierung von Produktionsprozessen und Ereignisregeln* unterteilt, die jeweils die erforderlichen Funktionen im Sinne der Modellierung erfüllen (vgl. PIELMEIER ET AL. 2017).

In einem ersten Schritt sind die Ereignisdaten zu strukturieren und somit eine grundsätzliche Struktur der Daten für die Kommunikation zwischen den Elementen des Systems festzulegen. Die Beschreibung der Strukturierung der Ereignisdaten erfolgt in Abschnitt 6.2.

In Abschnitt 6.3 wird die Erstellung eines strukturellen Ereignismodells erläutert. Dies dient dazu, die bekannten im System auftretenden Ereignistypen und die Zusammenhänge zwischen den Typen zu beschreiben. Hierfür werden den Ereignissen Attribute zugeschrieben und Beziehungen zwischen den Ereignissen zum Ausdruck gebracht. Für strukturelle Ereignismodelle ist insbesondere die Modellierung von Bedingungen, Beschränkungen und zeitlichen und hierarchischen Beziehungen zwischen den Ereignistypen ein wesentlicher Aspekt. Das strukturelle Ereignismodell ist unabhängig von der weiteren Ereignisverarbeitung und gibt ausschließlich Auskunft über die strukturellen Zusammenhänge der Ereignisse. (BRUNS & DUNKEL 2010)

Ziel der Modellierung der Produktionsprozesse (vgl. Abschnitt 6.4) ist die Einbindung von Expertenwissen für die darauf basierende Regelableitung. In Form von Regeln wird das Wissen hinsichtlich der Ereignisverarbeitung erfasst und gespeichert. Für die Verarbeitung der im Produktionsprozess auftretenden Ereignisse und im Hinblick auf den Einsatz von Sensoren sind insbesondere räumliche, logische und temporale Muster sowie Trends in den Datenströmen von Relevanz. Ebenso müssen für die Umsetzung der im strukturellen Ereignismodell definierten Beschränkungen und Bedingungen Regeln abgeleitet werden.

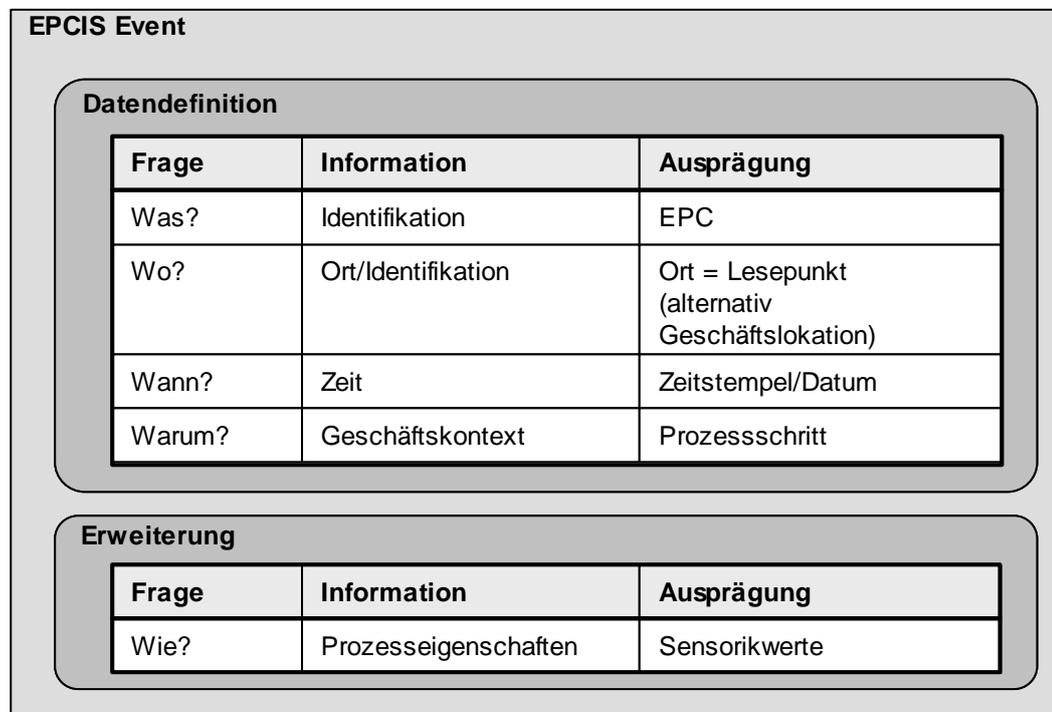
Da aktuell keine Standards für diese drei Bereiche existieren, werden nachfolgend für alle drei Aspekte Ansätze für die ereignisorientierte Modellierung ausgewählt und hinsichtlich der grundlegenden Gegebenheiten in Produktionsprozessen sowie der Aufgaben der Produktionssteuerung angepasst. Dies dient der Ausgestaltung einer durchgängigen Vorgehensweise für die ereignisorientierte Modellierung im Kontext von Produktionsumgebungen.

6.2 Strukturierung der Ereignisdaten

Für die Ereignisverarbeitung ist es essenziell, dass ein Ereignis alle für die weitere Verarbeitung relevanten Daten enthält, sodass mittels der Erfassung von Ereignissen in Echtzeit eine höhere Transparenz entlang der Prozesskette erreicht werden kann. Gleichzeitig ist jedoch darauf zu achten, dass die in einem Ereignis enthaltenen Informationen so gering wie möglich sind, um hohe Latenzzeiten zu vermeiden. So sollen die Ereignisse in erster Linie Informationen über Zustandsänderungen übertragen. Durch die Verwendung eindeutiger Identifikationsnummern, wie beispielsweise EPC, kann zudem auf Stammdaten der betreffenden Objekte referenziert werden, die in Datenbanken hinterlegt werden.

Die in Abschnitt 3.1.2 beschriebene ursprüngliche Strukturierung von Daten nach den EPCIS-Vorgaben umfasst die vier Informationsdimensionen bestehend aus den Leitfragen „was“, „wann“, „wo“ und „warum“ und dokumentiert damit Geschäftsereignisse in einer Wertschöpfungskette. Dabei bezieht sich die Frage „was“ auf die Identifikation des Ereignisses. Für die Ereignisverarbeitung benötigt jedes Ereignis eine eindeutige Ereignis-ID. Im Hinblick auf die Ereignisorientierung spielt der Faktor Zeit – impliziert durch die Frage „wann“ – ebenfalls eine wichtige Rolle. Die beiden Informationen sind Grundvoraussetzung für die weitere Verarbeitung und somit grundlegende Metadaten, die jeder Ereignistyp enthalten muss. Darüber hinaus ist die Frage „wo“, die Informationen hinsichtlich des Ortes umfasst, im Produktionsumfeld, insbesondere im Rahmen der Intralogistik, von Interesse. Dabei lassen sich über Sensoren, z. B. aus dem Bereich Auto-ID, örtliche Zusammenhänge erfassen. Diese können genutzt werden, um Transparenz hinsichtlich der Materialflüsse und der Arbeitsabläufe zu gewinnen. Ebenso können die Informationen über den Beginn und das Ende von Arbeitsvorgängen an einem bestimmten Ort bzw. einer Anlage zu Kennzahlen, wie der Durchlaufzeit, aggregiert werden. Durch die Angabe des Geschäftskontexts („warum“) wird der Prozessschritt und der Zustand (z. B. in Bearbeitung) dargestellt.

Um produktionsrelevante Ereignisse der einzelnen Prozesse ebenfalls dokumentieren zu können, ist eine Erweiterung des EPCIS-Ereignisses nötig (vgl. ENGELHARDT 2015, DIN SPEC 91329, PIELMEIER ET AL. 2017). Die Erweiterung und Strukturierung der Daten ist in Abbildung 21 dargestellt.



*Abbildung 21: Erweitertes EPCIS-Ereignismodell
in Anlehnung an DIN SPEC 91329 und PIELMEIER ET AL. (2017)*

Über die vier Leitfragen hinaus müssen die Ereignisse gezielte Informationen zu den im Rahmen des Produktionsprozesses erzeugten Sensorwerten enthalten. Diese Zusatzdaten werden beispielsweise für die Erfassung der Prozessparameter von Anlagen, wie Temperatur und Druck, mittels geeigneter Sensorik benötigt. Somit lässt sich eine höhere Transparenz in der Datenerfassungsebene erzielen und die Daten können mit geeigneten statistischen Ansätzen oder Methoden aus dem Bereich Data-Mining analysiert werden.

6.3 Modellierung von Ereignishierarchien

6.3.1 Allgemeines

Nach DUNKEL ET AL. (2009) und ROZSNYAI ET AL. (2007) ist die Definition eines anwendungsspezifischen Ereignismodells für die Ableitung einer ereignisorientierten Systemarchitektur essenziell. ROZSNYAI ET AL. (2007) begründen dies damit, dass Ereignisquelle und -senke Daten austauschen, dabei aber zugleich entkoppelt sind. Der Ereignisproduzent und der Ereigniskonsument tauschen zur Informationsübertragung ausschließlich Ereignisse aus, weshalb die in der Anwendung erzeugten und zu verarbeitenden Ereignisse mithilfe eines Ereignismodells vorab klar definiert werden müssen. Ereignismodelle umfassen alle für die Anwendungsdomäne relevanten Ereignistypen und bilden demnach die Grundlage für die Gestaltung der Systemarchitektur. Sie beschreiben die Attribute, die Eigenschaften, die hierarchischen Zusammenhänge und die Beziehungen der Ereignistypen. Dadurch wird der Rahmen vorgegeben, in dem sich die darauf basierenden Ereignisregeln bewegen dürfen. Zusätzlich können einfache Regeln direkt aus den innerhalb des Ereignismodells spezifizierten Beschränkungen, die auch Constraints genannt werden, abgeleitet werden. Aus der Hierarchie der Ereignisse können ebenfalls logische Schlüsse über den Aufbau der Ereignisregeln abgeleitet werden. Meist entspricht die Ereignishierarchie den auszuführenden Abstraktionsschritten. Das Definieren von Ereignistypen ist außerdem eine grundlegende Voraussetzung für die Mustererkennung mithilfe von Ansätzen des Data-Minings (ROZSNYAI ET AL. 2007). Im Rahmen der Regelableitung sollen Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Ereignissen erkannt werden. Hierfür ist das Wissen bezüglich der unterschiedlichen Ereignistypen und deren spezifischen Eigenschaften bei der Analyse der Ereignisse hilfreich, um Ähnlichkeiten und Unterschiede zwischen Ereignissen aufzudecken. Ein Ereignismodell hat somit erhebliche Auswirkungen darauf, ob und wie Ereignismuster in Ereignisströmen entdeckt werden.

Es existieren derzeit keine Standards zur formalen Beschreibung von Ereignismodellen. Ereignisse werden häufig in der Regelsprache (EPL) beschrieben, in der auch die Ereignismuster und -regeln formuliert werden (ADI ET AL. 2006). Dadurch kommt es zu einer Vermischung von Ereignisdefinition und Ereignisverarbeitung. Ereignisse sind das Schlüsselkonzept ereignisorientierter Anwendungen, deshalb trägt die präzise Formulierung eines Ereignismodells zu einer verbess-

serten Systemarchitektur bei. Strukturelle Ereignismodelle bleiben für einen Anwendungsfall meist über einen längeren Zeitraum gültig bestehen und sind seltener Änderungen unterworfen als die Ereignisverarbeitung, die ständigen Iterationen zur Verbesserung unterliegt. Im Rahmen dieser Arbeit werden daher die Eigenschaften und Zusammenhänge zwischen den Ereignissen durch das strukturelle Ereignismodell beschrieben und klar getrennt davon die Ereignisverarbeitung betrachtet.

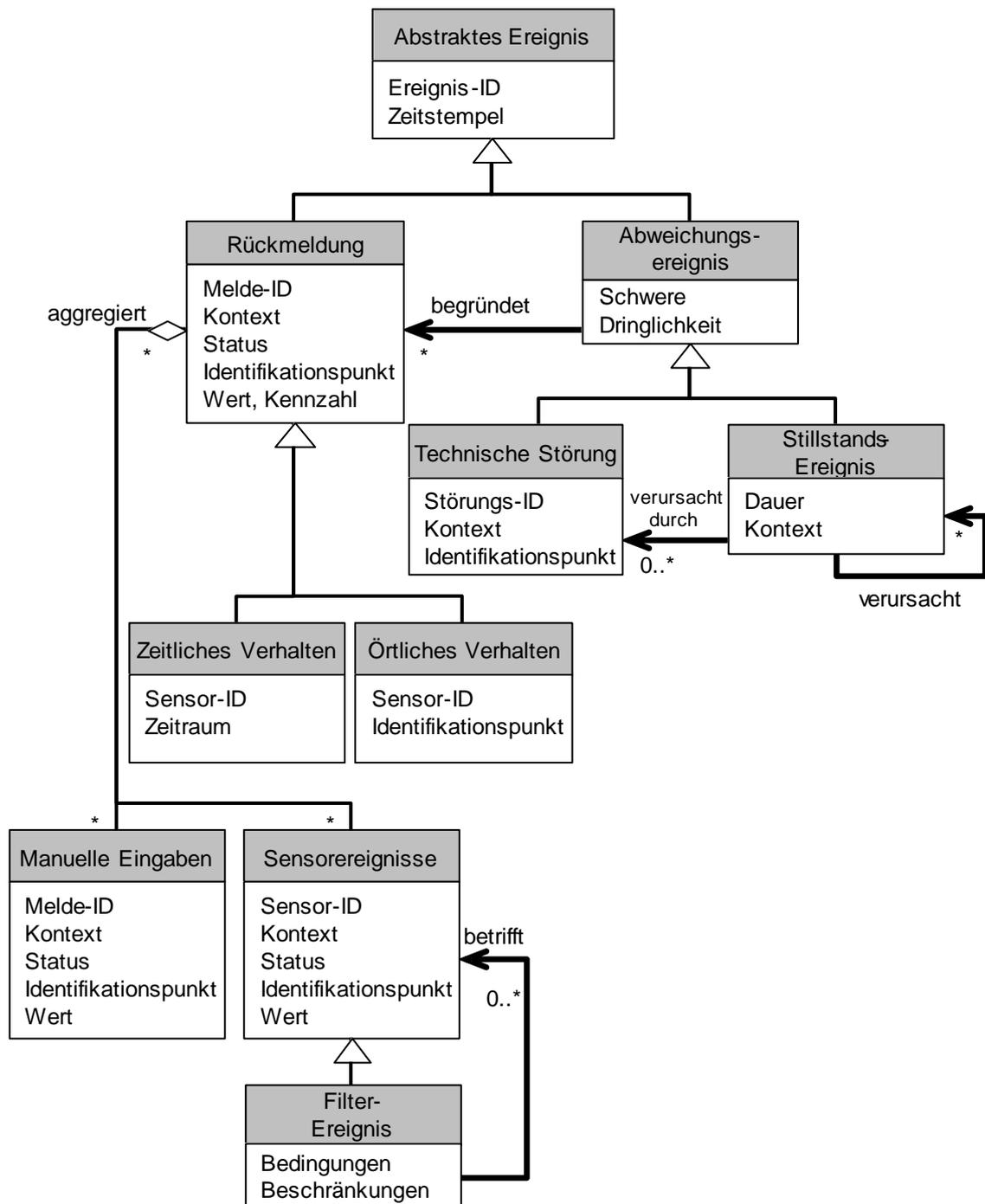
Das strukturelle Ereignismodell hat die Aufgabe, alle auftretenden Ereignistypen inklusive der zugehörigen Attribute darzustellen. Ebenso müssen die Beziehungen zwischen den Typen dargestellt werden. In Anlehnung an die UML kommen hierbei Beziehungen, wie beispielsweise die Vererbung, die Assoziation und die Aggregation, zum Einsatz. Ereignishierarchien werden durch einen Vererbungspfeil dargestellt. Damit werden neue Ereignistypen als Untertypen von übergeordneten Ereignissen definiert, welche deren Eigenschaften übernehmen. Eine Assoziation stellt eine semantische Beziehung zwischen zwei oder mehr Klassen dar. Assoziationen können dabei gerichtet oder ungerichtet sein. Analog zu den Attributen können auch Assoziationen Multiplizitäten und Namen zugeordnet werden. Grafisch werden Assoziationen als Verbindungslinien zwischen zwei Klassen dargestellt. Gerichtete Assoziationen werden dabei mit einem Pfeil in Navigationsrichtung versehen. Eine Aggregation ist eine Sonderform der Assoziation und wird verwendet, um ein Verhältnis zwischen zwei Klassen als „Ist Teil von“-Beziehung auszudrücken. Sie zeigt somit auf, welches Element in der Organisationseinheit über dem anderen steht. Durch Kardinalitäten wird im Ereignismodell die Anzahl der an einer Beziehung beteiligten Ereignisinstanzen definiert. Ereignisinstanzen sind gleichzusetzen mit Ereignisobjekten und repräsentieren ein konkretes Vorkommnis und damit eine Ausprägung eines Ereignistyps (BRUNS & DUNKEL 2010). So muss ein Temperaturänderungs-Ereignis beispielsweise aus mindestens zwei Temperatur-Ereignissen zusammengesetzt werden. Eine Kardinalität wird durch Angabe einer Ober- und Untergrenze oder durch einen konkreten Wert beschrieben. UML bietet eine direkte Unterstützung zur Modellierung der Kardinalität von Ereignissen. Diese werden in UML Multiplizität genannt und unterhalb der Verbindungslinie, die die Ereignisinstanzen verbindet, angegeben. (OMG 2017)

6.3.2 Strukturelles Ereignismodell für die Produktionssteuerung

Nachfolgende Abbildung 22 zeigt das im Rahmen der Arbeit entwickelte strukturelle Ereignismodell für die Produktionssteuerung. Dieses umfasst dabei grundlegende Ereignistypen, die im Rahmen der Produktion auftreten. Ebenso werden die zugehörigen Attribute je Ereignistyp dargestellt, welche sich an der in Abschnitt 3.1.2 erläuterten Strukturierung der Ereignisdaten nach EPCIS orientieren. Zudem werden die hierarchischen und logischen Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen den unterschiedlichen Ereignistypen im Ereignismodell aufgezeigt. Da das nachfolgende strukturelle Ereignismodell als Referenz für den Bereich der Produktionssteuerung dienen soll, werden ausschließlich die für den Bereich der Produktionssteuerung relevanten Ereignistypen dargestellt. Konkrete Ausprägungen dieser Ereignistypen in Form von Ereignisinstanzen sind stark abhängig vom jeweiligen Anwendungsbeispiel und werden an dieser Stelle deshalb nicht weiter detailliert. Für die Definition der unterschiedlichen Ereignistypen werden zunächst die möglichen Ereignisquellen im Rahmen von Produktionsprozessen betrachtet. Produktionsrelevante Daten und Rückmeldungen können automatisiert mittels Sensorik an Anlagen und Produkten oder manuell mit Rückmeldeterminals erfasst werden.

Produktionsumgebungen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit als ereignisgesteuerte Systeme aufgefasst, wobei die im Produktionsprozess mittels geeigneter Sensorik erzeugten Ereignisse zu komplexen Kennzahlen mit einem höheren Abstraktionsgrad und einer höheren Aussagekraft transformiert werden. Im Hinblick auf die Aggregation von steuerungsrelevanten Kennzahlen sind für die Produktionssteuerung insbesondere Veränderungen in den Bewegungsdaten von Interesse. Bewegungsdaten umfassen sich ändernde Zustände, wobei sie sich auf die am Produktionsprozess beteiligten Personen, Aufträge, Fertigungs- und Betriebsmittel beziehen. Es werden dabei zeitliche, örtliche, mengenmäßige sowie kapazitäts- und auftragsbezogene Änderungen angegeben. Da als Grundlage für die Ereignisverarbeitung jedes Ereignis über eine eindeutige ID sowie über eine Angabe zum Auftrittszeitpunkt verfügen muss, enthält das Ereignismodell ein *abstraktes Ereignis*, das diese essenziellen Daten umfasst und somit in der Hierarchie den anderen *Ereignistypen* übergeordnet ist.

6.3 Modellierung von Ereignishierarchien



Legende:

◊ — : Aggregation

◻ : Ereignistyp und Attribute des Ereignistyps

◁ — : Vererbung

→ — : Assoziation

Abbildung 22: Strukturelles Ereignismodell für die Produktionssteuerung

Sensorereignisse erzeugen automatisiert und kontinuierlich Daten und dienen beispielsweise der Erfassung von Anlagendaten, wie der Temperatur, oder der Erfassung der Position von Produkten mittels Auto-ID-Technologien. Diese Ereignisse werden durch den Typ Sensorereignis beschrieben. Da es im Bereich der Sensorik häufig zu fehlerhaften und inkonsistenten Daten kommt, müssen durch die Angabe von Bedingungen in Form von Filterereignissen, fehlerhafte Daten direkt entfernt und korrigiert werden.

Ergänzend dazu existieren *manuelle Eingaben* durch die Mitarbeiter, die Produktionsdaten an Rückmeldeterminals eingeben und z. B. die Fertigstellung eines Arbeitsvorgangs quittieren.

Die den beiden Kategorien zugeordneten Ereignisse können zu Rückmeldungen aggregiert werden, die Kontextwissen einbeziehen und auf deren Basis steuerungsrelevante Kennzahlen abgeleitet werden. Die mittels MDE und BDE erfassten Daten stellen Vertreter der aggregierten Rückmeldungen dar. Im Zuge der Aggregation wird hierbei durch die Einbeziehung von Kontextwissen, wie z. B. den Auftragsdaten, eine höhere Abstraktionsebene erreicht. Die MDE bezieht sich auf die an einer Maschine anfallenden Informationen und umfasst Prozess- und Produktdaten. BDE-Daten berücksichtigen technologische (z. B. Abnutzung von Produktionsmitteln) und organisatorische Daten (z. B. Personal- und Auftragsdaten). Die Aggregation zu Kennzahlen kann hinsichtlich des *zeitlichen* und des *örtlichen Verhaltens* erfolgen. Für das zeitliche Verhalten werden Ereignisse über einen Zeitraum zusammengebracht. Für das örtliche Verhalten werden für einen bestimmten Zeitpunkt ortsnahe stattfindende Ereignisse berücksichtigt.

Basierend auf den aggregierten Rückmeldungen kann wiederum ein komplexes *Abweichungsereignis* abgeleitet werden, das Erkenntnisse zur Schwere und Dringlichkeit der auftretenden Ereignisse enthält. Beim Abweichungsereignis handelt es sich um komplexe Ereignisse, da für das Erkennen dieser Ereignisse die Ereignisströme auf Muster, die auf Expertenwissen basieren, untersucht werden. Zudem müssen Informationen bzgl. der geplanten Soll-Werte mit einfließen. Auf dieses Thema wird in Abschnitt 8.3 vertieft eingegangen. Ereignisse die sich aus den Abweichungsereignissen ableiten sind einerseits *technische Störungen*, welche Informationen zum Kontext und dem Ort der Störung angeben, und andererseits *Stillstandsereignisse*, die neben dem Kontext Informationen zur Dauer der Störung bereitstellen. Ursächlich für Stillstände kann

neben einer technischen Störung auch eine reflexive Beziehung zwischen Stillstandsereignissen sein, sodass ein Stillstand einer Anlage eines vorgelagerten Prozessschritts Stillstände bei nachfolgenden Prozessschritten verursacht.

6.4 Modellierung von Produktionsprozessen und Ereignisregeln

6.4.1 Allgemeines

Die Ereignisverarbeitung basiert auf den hinterlegten Ereignisregeln, die für den zu überwachenden Prozess definiert werden. Die Ereignisregeln repräsentieren das domänen- und prozessspezifische Fachwissen bzgl. der Prozesse. Zudem werden Beschränkungen, Bedingungen und Beziehungen zwischen Ereignistypen und Ereignisinstanzen in den Ereignisregeln abgebildet. Grundsätzlich besteht jede Ereignisregel aus einem Ereignismuster und einem Aktionsteil, welcher bei Auftreten der durch das Muster beschriebenen Situation ausgeführt wird. Aktionen können dabei beispielsweise das Erzeugen eines neuen Ereignisses, der Aufruf eines Dienstes oder das Auslösen einer Benachrichtigung sein. Die Ereignisregeln werden mittels EPLs formuliert. Für die Modellierung der Ereignisregeln existiert kein Standard, sodass die Gestaltung der Regeln in der Praxis in der Ereignissprache der jeweiligen Event Processing Softwareumgebung erfolgt. Im Bereich CEP werden unterschiedliche Arten von Sprachen verwendet. Diese lassen sich nach ECKERT & BRY (2009) in drei Kategorien einteilen. *Datenstrombasierte Sprachen*, wie die Continuous Query Languages (CQL), stellen eine Erweiterung der etablierten Datenbankabfragesprache Structured Query Language (SQL) dar. *Kompositionoperatorbasierte Sprachen* sind spezielle für CEP entwickelte imperative Skriptsprachen. Die dritte Kategorie sind *logikbasierte Sprachen*, die auf regelbasierte Softwareumgebungen ausgerichtet sind.

Die Ereignisse können durch unterschiedliche Beziehungen und Bedingungen miteinander in Zusammenhang stehen (HEDTSTÜCK 2017). Abbildung 23 zeigt mögliche Kategorien für Beziehungen zwischen Ereignissen, welche in erster Linie logische, zeitliche oder räumliche Muster sein können.

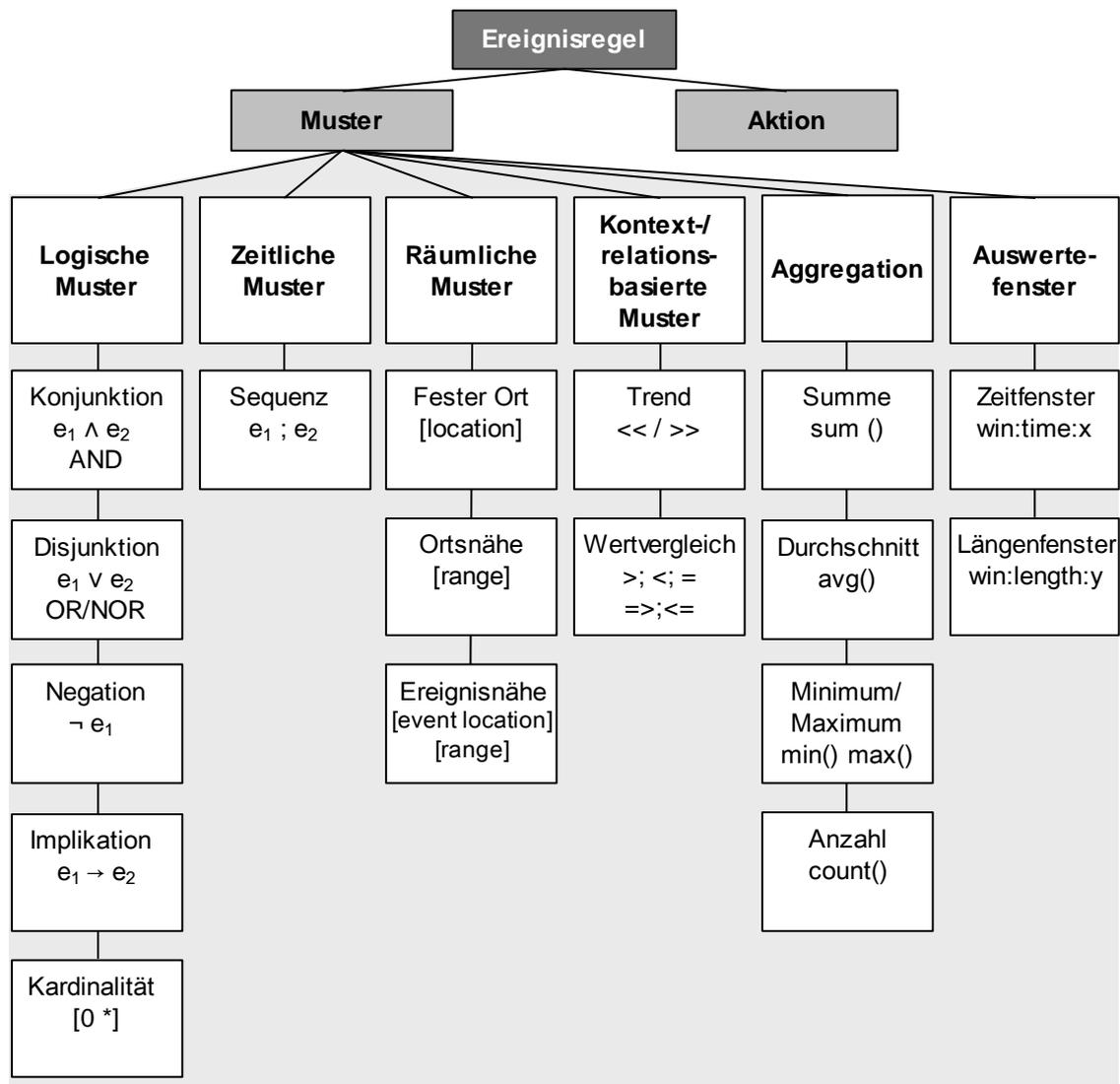


Abbildung 23: Arten von Ereignismustern und Operatoren

Logische Muster zwischen Ereignissen können in unterschiedlichen Ausprägungen vorliegen. Die Ereignisalgebra definiert anhand der folgenden Operatoren die Beziehungen und Einschränkungen für die Ereignisse (vgl. HEDTSTÜCK 2017):

Boolsche Operatoren

Auf Grundlage der Booleschen Operatoren kann definiert werden, welche Typen von Ereignisinstanzen auftreten müssen, um ein gewisses Muster zu erfüllen. Dabei gibt die Konjunktion (\wedge) an, dass zwei oder mehrere Ereignisse eingetreten sein müssen. Eine Disjunktion (\vee) erfordert im Falle einer nicht-ausschließenden Disjunktion, dass entweder Ereignis e_1 oder Ereignis e_2 oder beide Ereignisse aufgetreten sind. Für den Fall einer ausschließlichen Disjunktion (NOR) darf jedoch lediglich eines der beiden Ereignisse eingetreten sein.

Negation

Die Negation (\neg) ist nur sinnvoll, wenn sie auf einen Ausschnitt eines Ereignisstroms bezogen wird. Sie besagt damit, dass ein Ereignis nicht in einem bestimmten Abschnitt eines Ereignisstroms eintreten darf.

Implikation

Die Implikation (\rightarrow) bezieht sich ebenfalls auf ein definiertes Auswertefenster und gibt an, dass, wenn ein Ereignis e_1 eingetreten ist, auch ein Ereignis e_2 aufgetreten sein muss. Die zeitliche Reihenfolge spielt dabei keine Rolle.

Kardinalität

Die Kardinalität $[0, *]$ beschreibt, dass ein oder mehrere Ereignisse in einer bestimmten Häufigkeit auftreten müssen. Die Anzahl kann fest, variabel oder auf eine gewisse Spanne bezogen sein.

Die Ereignisse können in diversen zeitlichen Beziehungen zueinanderstehen, so können sie z. B. nacheinander oder gleichzeitig stattfinden. Ebenso können die Ereignisse einen gemeinsamen Start- oder Endzeitpunkt haben. Neben Zeitpunkten können dabei auch Zeiträume und deren Beziehungen zu Zeitpunkten oder anderen Zeiträumen relevant sein. Für die Aggregation von steuerungsrelevanten Kennzahlen sind zeitliche Beziehungen, wie der Start- und Endzeitpunkt eines Arbeitsvorgangs, von Interesse. Die Abfolge von Ereignissen wird dabei als Sequenz bezeichnet.

Sequenzen

Für die Darstellung der zeitlichen Reihenfolge von Ereignistypen wird ein Semikolon als Sequenz-Operator ($E_1; E_2$) verwendet. Die Abfolge von Ereignistypen kann durch die Schreibweise $\{e_1, e_2\}$ dargestellt werden.

Insbesondere für den Anwendungsbereich der Produktionstechnik sind im Hinblick auf den Einsatz von Ortungstechnologien räumliche Beziehungen zwischen Ereignissen von hoher Relevanz. So können sich die Ereignisse an einem *fixen Ort* oder in *Ortsnähe* innerhalb eines bestimmten Bereiches – auch Geofence genannt – ereignen. Darüber hinaus kann auch die *Ereignisnähe* von Interesse sein, wobei ein oder mehrere Ereignisse im Umkreis eines bestimmten Ereignisses stattfinden. Ein zentraler Punkt zur Begrenzung der Rechenzeit für die Ereignisverarbeitung ist in diesem Zusammenhang die Art und Länge des definierten Auswertefensters. Anhand der Fenster wird die Menge der auszuwertenden Ereignisse in den Ereignisströmen abgegrenzt. So bedeutet z. B. eine Fensterlänge von zwei Minuten, dass nur Ereignisse, die innerhalb dieser Zeit auftreten, berücksichtigt werden. Anstatt

eines Zeitfensters kann ebenso ein Längenfenster definiert werden, sodass beispielsweise die letzten fünf Ereignisse betrachtet werden. Diese Art der Auswertefenster werden auch Sliding Windows genannt und durch „win:time:x“ bzw. „win:length:y“ spezifiziert. Diese Art von Auswertefenstern kommt häufig zum Einsatz, während flexiblere Formen, die nicht dem FIFO-Prinzip entsprechen, als Bewegungsarten für die Fenster seltener verwendet werden. (HEDTSTÜCK 2017)

Für die Produktionssteuerung stellen zudem die Aggregation und die kontext- und relationsbasierten Muster wichtige Kategorien der Ereignisbeziehungen dar. Bei der Aggregation steht die Auswertung der Attributwerte der Ereignisinstanzen im Vordergrund. Häufig werden Schwellenwertfunktionen (engl. threshold functions) verwendet, die vorgeben, welche Werte erreicht werden müssen, damit ein definiertes Muster erfüllt wird und somit eine Situation, die eine entsprechende Reaktion erfordert, eingetreten ist. CQL-Sprachen sind speziell für die Abfrage relationaler Muster ausgerichtet. Dabei bestehen die zu erkennenden Muster häufig aus Kombinationen von Relationen und Aggregationen. (HEDTSTÜCK 2017)

Als Kommunikationsbasis zwischen Fachexperten, die über das Wissen bezüglich des zu steuernden Prozesses verfügen, und den IT-Experten, die die gewünschten Regeln in „Code“ umsetzen müssen, empfiehlt es sich, Produktionsprozesse inklusive der bekannten Beziehungen, Beschränkungen und Auswerteanforderungen grafisch zu modellieren. Für die ereignisbasierte Steuerung dynamischer Produktionsprozesse sind dazu geeignete Methoden und Modelle zur Gestaltung der Ereignisverarbeitung erforderlich. Die Anreicherung von Prozessabläufen mit Konzepten der Ereignisverarbeitung stellt einen guten Ansatz zur Ableitung und Darstellung von Ereignisregeln dar. Wie im Stand der Technik und Forschung (vgl. Abschnitt 3.1.4) dargestellt, können mit den Standardmodellierungsnotationen keine komplexen Ereignismuster ausgedrückt werden.

Die aktuellen Ansätze fokussieren stark die Modellierung von Geschäftsprozessen (z. B. für das Bankenwesen), weisen jedoch keine adäquate Berücksichtigung der Modellierung von Produktionsprozessen auf und sind nicht ausreichend übersichtlich. Aus diesem Grund wird nachfolgend ein Modellierungsvorgehen für die übersichtliche Darstellung von Produktionsprozessen sowie den darauf basierenden Ereignisregeln entwickelt. Dabei sollen die einzelnen Elemente der Ereignisregeln definiert werden und gleichzeitig die Beziehung zum Produktionsprozess klar erkenntlich sein. Es muss somit eine Modellierungsnotation für die ereignisorientierte Darstellung des Produktionsprozesses ausgewählt und entsprechend angepasst werden. Hier liegt einerseits der Fokus der Betrachtung auf den Abläufen

innerhalb der maßgeblich durch Ereignisse bestimmten Produktionsprozesse, andererseits sind die in Abbildung 23 genannten Beziehungen zu modellieren. Jedoch stehen nicht alle diese Beziehungen direkt mit den dynamischen Abläufen in Verbindung, so spiegeln manche das Wissen bzgl. der Prozesse wider und bestimmen dadurch die einzelnen Elemente der Ereignisregeln. Für die klare Repräsentation der Ereignisregeln werden daher auch Ansätze zur Wissensrepräsentation (wie z. B. Entscheidungstabellen und -bäume) berücksichtigt und an die Ereignisverarbeitung angepasst.

Die Modellierung der Produktionsprozesse erfolgt auf Basis der EPK, weshalb die EPK-Notation nachfolgend kurz erläutert wird. Laut KRCMAR (2011) sind für die detaillierte Modellierung von Produktions- und Logistikprozessen insbesondere *Ereignisgesteuerte Prozessketten (EPK)* geeignet. Die Grundelemente der EPK sind:

- Funktionen,
- Ereignisse und
- Konnektoren.

Funktionen stellen zeitverbrauchende Tätigkeiten dar, die durch Ereignisse ausgelöst werden. Ereignisse sind dabei durch das Eintreten eines Zustandes definiert. Ereignisse und Funktionen sind mittels Konnektoren miteinander verbunden. Eine Einschränkung der EPK-Notation lautet, dass nicht zwei Ereignisse aufeinanderfolgen dürfen, sondern sich Funktionen und Ereignisse stets abwechseln müssen.

Diese Einschränkung muss jedoch im Hinblick auf die Ereignisverarbeitung vernachlässigt werden, da ein Ereignis auch ein weiteres Ereignis zur Folge haben kann. Die EPK zeichnet sich wegen der geringen Anzahl von Modellierungselementen und der leicht verständlichen Symbolik durch eine hohe Übersichtlichkeit und eine einfache Erlernbarkeit aus. Aufgrund der klar gehaltenen Symbolik sind EPK auch für ungeübte Nutzer ohne fundiertes Hintergrundwissen nachvollziehbar.

Für eine plattformunabhängige Spezifikation von Ereignisregeln und -mustern wird meist auf Pseudosprachen zurückgegriffen, um Zusammenhänge und Beziehungen zwischen Ereignissen darzustellen. Dieses Vorgehen fördert auch das Verständnis zwischen Fachanwendern und Softwareentwicklern (vgl. Etzion & Niblett 2010, Luckham 2012). Pseudosprachen enthalten häufig sprachliche Elemente wie „if“, „then“, „while“, „do“, „and“, „or“, „select“, „>“, „<“, „=“ etc. Es gibt keine

allgemeingültige standardisierte Pseudosprache. Die Verwendung von Pseudocodes erleichtert es den Fachanwendern, die Ereignisregeln zu verstehen und eventuell selbst zu definieren. Diese Modellierungsart stellt aber keine übersichtliche Visualisierung der Ereignisregel dar. Die Ereignisregeln müssen anschließend weiterhin in die korrekte EPL des jeweiligen Softwareprodukts überführt werden.

6.4.2 Ansatz zur Modellierung von Produktionsprozessen und Ereignisregeln

Abbildung 24 gibt einen Überblick über den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Modellierungsansatz für die Darstellung von Produktionsprozessen in Verbindung mit den darauf basierenden Ereignisregeln. Logische, zeitliche und räumliche Muster werden dabei in Form der EPK-Notation dargestellt. Ein Ereignisregelcontainer umfasst sowohl den Prozessablauf, der durch die Verknüpfung von Ereignissen und Funktionen mittels der EPK-Notation dargestellt wird, als auch die Ereignisregeln, die durch eine Baumstruktur dargestellt werden.

Die Sequenzen der Ereignisse, aus welchen sich die zeitlichen Muster ableiten, werden über die Modellierung der Abläufe innerhalb der Prozesse abgebildet. Die logischen Muster werden mittels der Konnektoren ausgedrückt. Für die Darstellung der Kardinalität und der Negation sind Ergänzungen an den Verbindungselementen erforderlich.

Ereignisregeln können mithilfe von Baumstrukturen dargestellt werden, die eine für den Menschen angenehme Art der Repräsentationsform von Wissen sind. Hierarchische Zusammenhänge sind in einem verzweigten Baum übersichtlich visualisiert. Für die Wissensrepräsentation erfolgt die Modellierung der Ereignisregel daher mit einer Baumstruktur. Die Elemente der Ereignisregeln, wie die kontext- und relationsbezogenen Beziehungen sowie die Vorgaben zur Aggregation und die Definition der Auswertefenster, werden dementsprechend durch die Baumstruktur abgebildet.

Die Aktionen können ebenfalls im Rahmen der Baumstruktur definiert werden. Je nach Ereignis kann die Aktion aber auch mit der im Rahmen des EPK-Modells definierten Funktion übereinstimmen oder eine Maßnahme zur Ereignisbehandlung sein. Eine detaillierte Betrachtung des Aktionsteils erfolgt in Abschnitt 8.4 anhand der Definition möglicher Maßnahmen für die ereignisorientierte Produktionssteuerung.

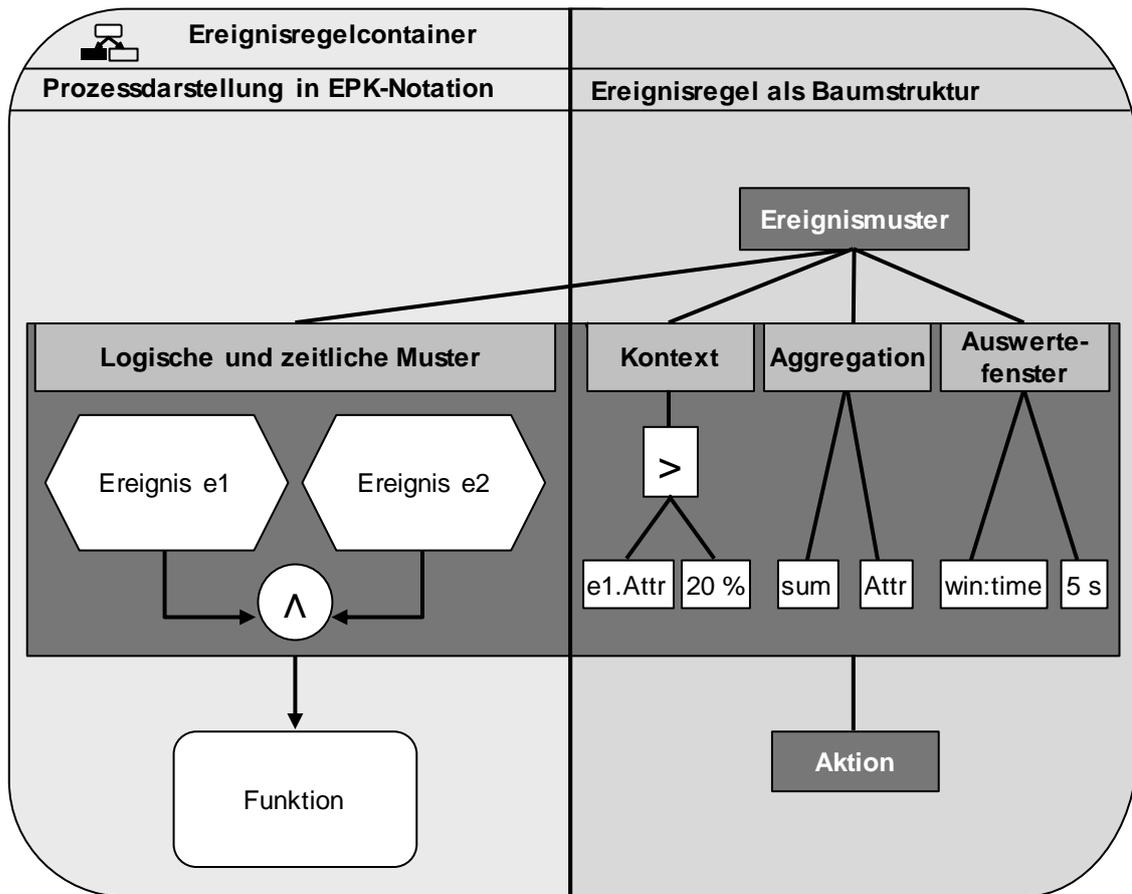


Abbildung 24: Modellierung von Produktionsprozessen und Ereignisregeln

6.5 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurden Ansätze zur Modellierung für den Bereich der Ereignisverarbeitung entwickelt. Hierfür wurden die unterschiedlichen im Rahmen der Ereignisverarbeitung relevanten Bereiche definiert. Zunächst musste ein Ansatz für die Strukturierung der Ereignisdaten gestaltet werden, um die Grundlage für die Kommunikation festzulegen. Hierfür wurde eine Erweiterung des EPCIS-Standards durchgeführt.

Für die Festlegung der verwendeten Ereignistypen ist die Modellierung der Ereignishierarchie erforderlich. Hierfür wurde ein strukturelles Ereignismodell für die Produktionssteuerung in Form eines UML-Klassendiagramms entworfen.

6 Ereignismodellierung

Als Ansatz für die Modellierung der Produktionsprozesse und der Ereignisregeln wurde zudem ein zweistufiges Vorgehen dargelegt. Im ersten Schritt sind die Abläufe und die logischen Zusammenhänge mittels einer angepassten EPK-Notation zu modellieren. In Ergänzung dazu ist das Wissen bezüglich der Zusammenhänge und der Beschränkungen für die jeweilige Abfolge von Ereignissen mittels einer Baumstruktur festzuhalten. Durch den kombinierten Einsatz dieser beiden Modellierungsansätze wird eine durchgängige und übersichtliche Visualisierung der Ereignisregeln in Verbindung mit den Produktionsprozessen ermöglicht.

Die Ereignismodellierung stellt die Grundlage für die im nachfolgenden Kapitel 7 behandelte Ereignisverarbeitung und -analyse dar und hat zudem Einfluss auf die in Kapitel 8 entwickelte Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung.

7 Ereignisverarbeitung und -analyse

7.1 Allgemeines

Das nachfolgende Kapitel widmet sich der Ereignisverarbeitung und -analyse. Hierzu wird zunächst in Abschnitt 7.2 eine Referenzarchitektur für die ereignisorientierte Produktionssteuerung entwickelt, die als Grundlage für die Implementierung einer ereignisorientierten PPS genutzt werden kann. Die Referenzarchitektur ist eine plattformunabhängige Beschreibung für die Integration der Ereignisverarbeitung in die PPS.

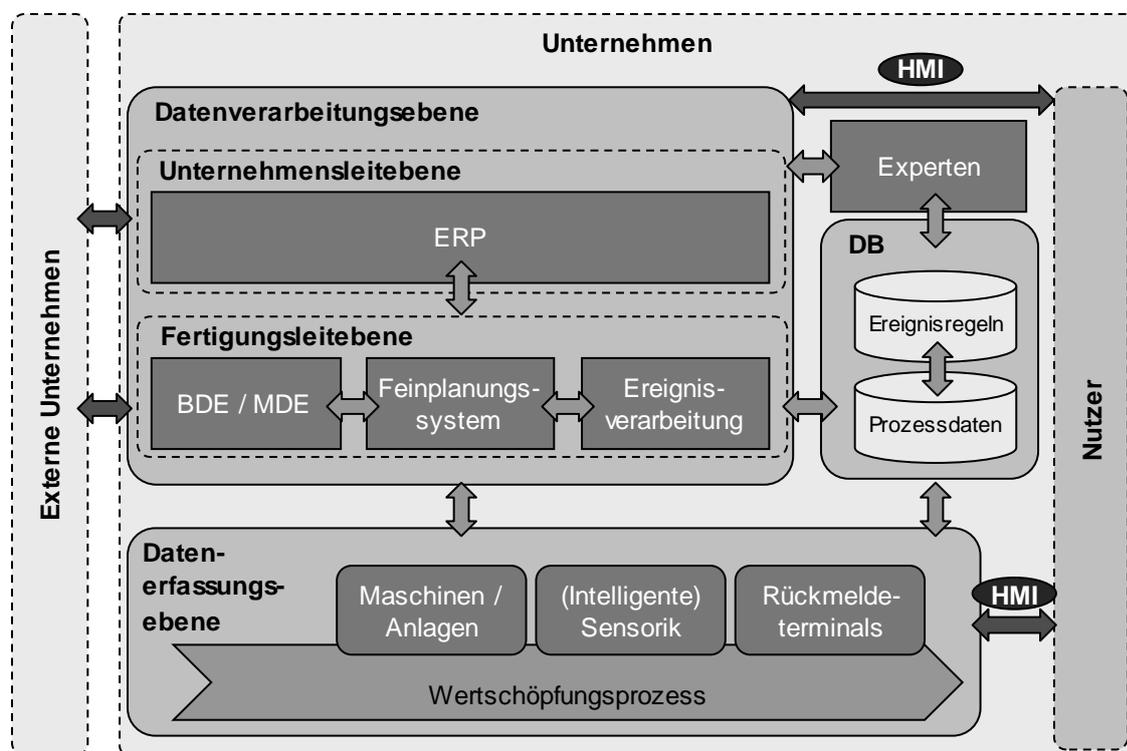
Die Ereignisverarbeitung erfolgt maßgeblich auf Basis von hinterlegten Ereignisregeln, welche somit eine wesentliche Grundlage für die ereignisorientierte Produktionssteuerung darstellen. Neben der rein erfahrungsbasierten Definition der Ereignisregeln (vgl. Abschnitt 7.3.1) werden alternative Ansätze zur Ermittlung der Regeln vorgestellt und deren Einsatz im Kontext der Produktionssteuerung erläutert. Ziel ist es, Muster und Situationen in Produktionsprozessen echtzeitnah zu erfassen und entsprechende Reaktionen anzustoßen, die zu einer Verbesserung der logistischen Zielgrößen führen. Daher wird eine einfache, schnelle, zuverlässige sowie weitgehend automatisierte Mustererkennung angestrebt, um die Ereignisregeln den sich dynamisch ändernden Bedingungen in den Produktionsprozessen anzupassen und die Aktualität der Regeln sicherzustellen. Aus diesem Grund werden für die Regelableitung auch Methoden des Data-Minings (vgl. Abschnitt 7.3.2) in Betracht gezogen. Ebenso wird ein Vorgehen für die Definition von Eingriffsgrenzen vorgestellt (vgl. Abschnitt 7.3.3). Wichtige Randbedingungen für die Auswahl eines Ansatzes für die Mustererkennung und Regelableitung stellen die Datenverfügbarkeit und der Typ der zu analysierenden Eingangsdaten dar.

7.2 Referenzarchitektur für eine ereignisorientierte Produktionssteuerung

Im Rahmen der hier entwickelten Referenzarchitektur wird auf bekannte Definitionen, Richtlinien und Standards zurückgegriffen. Die Architektur beschreibt den Umfang dessen, was zur Implementierung der ereignisorientierten PPS erforderlich ist, geht dabei jedoch nicht auf unternehmensspezifische Softwarelösungen ein. Den Anwendern wird somit die Möglichkeit geboten, die Referenzarchitektur

7 Ereignisverarbeitung und -analyse

als Vorlage zu nutzen und nötige Anpassungen für die einzelnen Module entsprechend ihrer jeweiligen Softwarelandschaft vorzunehmen. Die in Abbildung 25 dargestellte Referenzarchitektur gibt einen Überblick über die Struktur sowie die erforderlichen Elemente und Schnittstellen für eine ereignisorientierte Produktionssteuerung. Sie kann daher als Referenzmodell verstanden werden, dabei soll ein Referenzmodell laut KRCMAR (2011) einen allgemeingültigen Charakter haben und als Ausgangslösung zur Entwicklung unternehmensspezifischer Modelle dienen. Bei der Entwicklung einer spezifischen Lösung kann auf das Referenzmodell Bezug genommen werden, für konkrete Anwendungsfälle muss eine bedarfsge- rechte Anpassung erfolgen (BECKER & DELFMANN 2004, MERTENS 2013).



Legende:

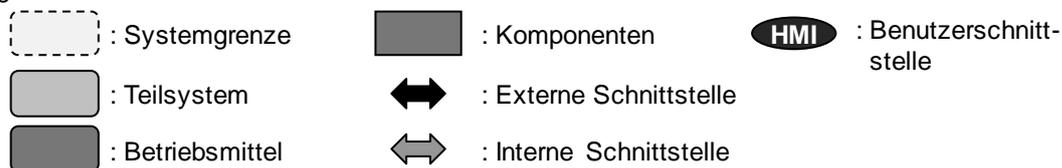


Abbildung 25: Ereignisorientierte Steuerungsarchitektur
in Anlehnung an PIELMEIER ET AL. (2017)

Der hier vorgeschlagene Ansatz für die Referenzarchitektur orientiert sich an dem im Rahmen der DIN SPEC 91329 vorgestellten Architekturbild. Die entwickelte Architektur besteht aus drei zentralen Bereichen: der *Datenerfassungs-* und der

7.2 Referenzarchitektur für eine ereignisorientierte Produktionssteuerung

Datenverarbeitungsebene sowie einer *Datenbank*. Angebunden sind sowohl externe Unternehmen als auch interne Nutzer und Experten des Unternehmens.

Die Basis der dargestellten Architektur bildet die *Datenerfassungsebene*. Sie bezieht sich in erster Linie auf die zur Fertigung und Montage des Produktes benötigte Infrastruktur. Auf der Fertigungsebene befinden sich Maschinen mit speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS), Sensoren, die Daten erfassen und teilweise direkt aufbereiten (intelligente Sensoren), sowie Rückmeldeterminals. Die Sensoren und Anlagen erzeugen diverse Datensätze parallel zur laufenden Produktion, wie z. B. den aktuellen Betriebsstatus oder die Position eines Werkstücks. Da diese Daten mitunter im Abstand weniger Millisekunden generiert werden, entsteht ein konstanter Datenstrom mit ungeordneten Ereignissen, welcher in den übergeordneten Ebenen verarbeitet werden muss. Dabei gilt es, eine einfache, flexible und gut skalierbare Anbindung der Maschinen und der Sensoren an die Datenverarbeitungsebene sicherzustellen. Auf der Erfassungsebene existieren universell einsetzbare Kopplungsmöglichkeiten, wie z. B. das Framework OPC Unified Architecture (OPC UA). OPC UA bietet Mechanismen zur standardisierten, synchronen oder asynchronen und verteilten Kommunikation zwischen Maschinen bzw. Sensoren und externen Kommunikationspartnern (STANGL ET AL. 2016, HOPPE 2017). Durch die Kombination von OPC UA via TSN (Time-Sensitive Networking) kann zukünftig auch Echtzeitfähigkeit garantiert werden (HOPPE 2017). Dies ist eine grundlegende Voraussetzung im Hinblick auf den Einsatz von OPC UA im Rahmen der Ereignisverarbeitung für die Produktionssteuerung. Um echtzeitnahe Reaktion auf Veränderungen im Produktionsprozess zielführend umsetzen zu können, muss eine kalkulierbare Zeitbasis für den Datenaustausch sichergestellt werden.

Die *Datenverarbeitungsebene* beinhaltet die Unternehmens- und die Fertigungsleitebene. Die übergreifende Auftrags- und Ressourcenverwaltung auf Unternehmensebene wird dabei von ERP-Systemen übernommen.

Die Feinplanung, die Maschinen- und Betriebsdatenerfassung sowie die Ereignisverarbeitung erfolgen auf der *Fertigungsleitebene*. Die entlang des Wertschöpfungsprozesses erzeugten Ereignisse werden mittels hinterlegter Ereignisregeln verarbeitet. Die Prozessdaten werden in einer Datenbank gespeichert. Aus diesen Daten können neue Ereignisregeln abgeleitet werden, um die Ereignisverarbeitung iterativ zu verbessern. Experten und Prozessverantwortliche können zudem ihr Fachwissen bei der Gestaltung der Ereignisregeln einbringen.

Anhand der entwickelten Referenzarchitektur wird aufgezeigt, wie sich die Ereignisverarbeitung sowie die Regelableitung in den Kontext der PPS einordnen. Zudem werden die erforderlichen Informationsflüsse herausgestellt. Dabei stehen die Schnittstellen zu den Ereignisquellen, wie z. B. Sensorik, Anlagen und übergeordnete Planungssysteme, und die Anbindung an historische Daten, die zur Generierung neuer Ereignisregeln genutzt werden, im Vordergrund.

Nachfolgend werden die im Hinblick auf die Ereignisverarbeitung relevanten Teilsysteme der Architektur erläutert.

Ereignisverarbeitung

Mit jeder Verarbeitungsstufe steigt die Komplexität der erzeugten Ereignisse, wohingegen die Anzahl der zu verarbeitenden Ereignissen sinkt. Die fachliche Verteilung adressiert diese Problematik, indem der Verarbeitungsprozess in Verarbeitungsstufen (z. B. Filterung, Content Enrichment und Analyse) unterteilt wird. Eine Verteilung nach inhaltlichen Aspekten, auch Content-Based Routing genannt (vgl. HOHPE & WOOLF 2004), ordnet Ereignisse in Abhängigkeit ihres Ereignistyps oder inhaltlicher Aspekte unterschiedlichen EPAs zu. Dies kann sinnvoll sein, wenn Ereignisströme mit hoher Heterogenität im Sinne vieler verschiedener Ereignistypen verarbeitet werden müssen (vgl. YANG ET AL. 2015). Dieses Konzept erleichtert zudem die Einbringung von domänenspezifischem Expertenwissen.

Der prioritätsbasierte Ansatz erfordert eine Priorisierung der Ereignisse. Das Ziel dieser Aufteilung ist die Sicherstellung der Verarbeitung von Ereignissen hoher Priorität (z. B. Fehlermeldungen oder Ereignisse sicherheitskritischer Prozesse), die nicht durch die Verarbeitung von Ereignissen niedriger Priorität beeinflusst werden sollte. Eine Kombination dieser Konzepte ist ebenfalls möglich.

Die Modularisierung ist insbesondere im Hinblick auf die Produktionssteuerung von Relevanz. Einerseits, um die erforderlichen Latenzzeiten einzuhalten, und andererseits, um die Maßnahmen anhand ihrer Auswirkungen zu priorisieren (vgl. Abschnitt 8.3.3).

Ereignisregeln

Mithilfe der Regelableitung sollen Experten bei der Definition der Regeln unterstützt werden. Hierfür ist der Einsatz zusätzlicher Systeme erforderlich. Aufgabe der Regelableitung ist es, die Regelbasis stets aktuell zu halten und somit eine Anpassung an die dynamischen Veränderungen innerhalb der Produktionsprozesse zu ermöglichen. Die Auswahl einer passenden Vorgehensweise ist dabei stark vom

jeweiligen Anwendungsfall und der verfügbaren Datenbasis abhängig. Ein wesentlicher Punkt ist die Erkennung relevanter Muster, die einen Eingriff im Sinne der Produktionssteuerung erfordern. Dazu müssen unbekannte Zusammenhänge in den Produktionsdaten ermittelt werden. Nachfolgend werden daher Ansätze zur Mustererkennung erläutert. Darüber hinaus müssen relevante Kennzahlen und Grenzwerte definiert werden, um Maßnahmen sinnvoll priorisieren zu können.

7.3 Mustererkennung für die ereignisorientierte Produktionssteuerung

Durch die Erkennung von Mustern können relevante Ereignisse identifiziert und klassifiziert werden. Dies ist die Grundlage für die Auswahl von Maßnahmen und Steuerungsstrategien in nachfolgendem Kapitel 8. Basierend auf dem Stand der Technik und Forschung sowie der Darstellung der Voraussetzungen hinsichtlich der Datenanalyse haben sich zwei näher zu untersuchende thematische Felder für die Mustererkennung herauskristallisiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden diese zwei Bereiche für die Erkennung von Mustern für die Regelableitung angewendet:

- Wissen von Fachexperten
- Data-Mining

Diese beiden Bereiche decken eine Vielzahl von möglichen Vorgehensweisen ab, die nachfolgend weiter detailliert werden. Daneben können stets auch statistische Auswertemöglichkeiten, z. B. zur Ermittlung von Grenzwerten, eingesetzt werden. Da im Rahmen dieser Arbeit die Erkennung unbekannter komplexer Muster in heterogenen, großen Datensätzen im Vordergrund steht, werden die statistischen Methoden nicht näher betrachtet. Eine Herausforderung für die Umsetzung des Data-Minings stellt die Vielzahl von Algorithmen dar, die zur Verfügung stehen und anwendungsfallbezogen ausgewählt werden müssen. Zunächst soll für die Mustererkennung eine Untersuchung der Eigenschaften des betrachteten Produktionsprozesses erfolgen, um auf dieser Basis die Voraussetzungen für den jeweiligen Ansatz erläutern zu können. Bei der Auswahl eines passenden Ansatzes gilt es, die Eigenschaften des zu untersuchenden Produktionsprozesses, wie z. B. den aktuellen Produktionszyklus, die Datenverfügbarkeit und den Grad der Komplexität der Ereignisse, zu berücksichtigen.

7 Ereignisverarbeitung und -analyse

Grundsätzlich lassen sich zwei Phasen für den Betrieb ereignisorientierter Systeme unterscheiden – die Initialisierung und der laufende Betrieb. In der Initialisierungsphase müssen die Ereignisregeln neu definiert werden. Im laufenden Betrieb hingegen müssen Veränderungen im Prozess möglichst schnell erkannt und neue, unbekannte Korrelationen aufgedeckt werden.

Aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen und Einsatzzwecke der Vorgehensweisen muss die Entscheidung für den geeigneten Ansatz immer individuell für den jeweiligen Produktionsprozess getroffen werden. Abbildung 26 gibt einen Überblick über die relevanten Kriterien, die für die Auswahl herangezogen werden können, und setzt diese in Beziehung zu den Ansätzen für die Mustererkennung. Die einzelnen Bereiche schließen sich dabei gegenseitig nicht aus und können parallel oder in Kombination zum Einsatz kommen.

		Ansätze für die Mustererkennung	
		Experten	Data-Mining
Eigenschaften von Produktionsprozessen	Produktionszyklus		
	Anlauf		
	Serie		
	Grad der Komplexität		
	einfach		
	komplex		
	Datenverfügbarkeit		
	gering		
	hoch		

Legende:

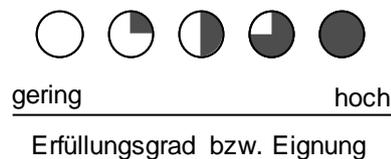


Abbildung 26: Eignung der Ansätze für die Mustererkennung in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Produktionsprozesses in Anlehnung an PIELMEIER ET AL. (2018a)

Einen entscheidenden Einfluss auf das vorhandene Fachwissen und die verfügbare Datenbasis hat dabei der Umstand, ob es sich beim betrachteten Prozess um einen Serienanlauf oder um einen beherrschten Serienprozess handelt. Wenn es sich um komplexe Sachverhalte handelt, welche durch Fachexperten nicht erkannt werden können, bietet der Einsatz von Algorithmen einen validen Ansatz, um Experten bei der Mustererkennung und somit bei der Regelableitung zu unterstützen. Bei einfachen Zusammenhängen können Experten jedoch aufwendigen Systemen überlegen sein. Hier gilt es, den Aufwand für die Implementierung eines Algorithmus bei der Auswahl des Ansatzes für die Mustererkennung mit in die Entscheidung einzubeziehen. Zudem ist die Auswahl von Algorithmen nur möglich und sinnvoll, wenn historische Daten in der geforderten Quantität und Qualität vorhanden sind und die Daten steuerungsrelevantes Wissen bzgl. des zu untersuchenden Prozesses enthalten (PIELMEIER ET AL. 2018a). Nachfolgend werden mögliche Algorithmen für den Einsatz zur Mustererkennung im Produktionsumfeld näher betrachtet.

7.3.1 Wissensarten für die ereignisorientierte Produktionssteuerung

Für die Auswahl des passenden Ansatzes zur Mustererkennung werden die unterschiedlichen Arten von Wissen, die bzgl. Produktionsprozessen vorliegen können, nachfolgend voneinander abgegrenzt und im Hinblick auf die Ereignisorientierung gegliedert. GEIGER (2015) unterscheidet im Rahmen seiner Arbeit zwischen auftragsfolgebezogenem, ressourcenbezogenem und allgemeinem Produktionswissen. Diese drei Kategorien werden in der vorliegenden Arbeit für den Bereich der Ereignisorientierung angepasst und in Beziehung gesetzt mit den eingeführten Kategorien der einzelnen Bestandteile von Ereignisregeln (vgl. Abbildung 23), sodass sich die folgende Einteilung ergibt:

Allgemeines Produktionswissen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird hierunter das Wissen bezüglich der Aggregation der Ereignisse zu steuerungsrelevanten Kennzahlen verstanden. Dieser Bereich kann durch die Erstellung eines strukturellen Ereignismodells ausreichend abgedeckt werden. Zu Ermittlung solcher Zusammenhänge sind Data-Mining-basierte Mustererkennungsansätze nicht geeignet.

Wissen bzgl. Sequenzen

Beim sequenziellen Wissen liegt der Fokus auf der Erkennung von Zusammenhängen, die durch die Abfolge von Ereignissen bestimmt werden. Darunter kann

das auftragsfolgebezogene Wissen ebenso wie das Wissen bezüglich der Vorgänge im Materialfluss verstanden werden. Zudem umfasst dieser Punkt Einflüsse, die sich bezogen auf das Personal durch Abfolgen von Schichten und Pausen ergeben. Hiermit werden folglich die räumlichen, zeitlichen und logischen Muster abgedeckt. Wissen bzgl. der Sequenzen kann durch Data-Mining-Ansätze ermittelt werden.

Kontextbezogenes Wissen

Das ressourcenbezogene Wissen fällt unter die Kategorie des kontextbezogenen Wissens. Im Sinne der vorliegenden Arbeit werden hierunter Zusammenhänge verstanden, die den Produktionszustand, wie beispielsweise Störungen und deren Dauer, betreffen. Daneben umfasst das kontextbezogene Wissen auch materialbezogenes Wissen, wie z. B. Informationen hinsichtlich Mengen, und personalbezogenes Wissen, z. B. Überstunden. Um kontextbezogenes Wissen bezüglich der Produktionsprozesse zu ermitteln, eignen sich ebenfalls Ansätze des Data-Minings. Darüber hinaus wird darunter auch die Definition von Erkenntnissen und Beschränkungen verstanden, die einzuhaltende Grenzwerte betreffen.

Im Sinne einer erweiterten Betrachtung können dabei auch Beziehungen zwischen physikalischen, chemischen oder geometrischen Sensormessgrößen verstanden werden, die maßgeblich die Produktqualität beeinflussen. Für die Ermittlung von qualitätsbezogenem Wissen werden überwachte Lernverfahren aus dem Bereich der Klassifikation eingesetzt. Häufig verwendete Algorithmen sind hierbei Entscheidungsbäume, neuronale Netze oder Support Vector Machines (vgl. HUBER 2017). Die Auswahl eines passenden Data-Mining-Ansatzes für qualitätsbezogenes Prozesswissen ist stark anwendungsabhängig und wird aus diesem Grund im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Wie anhand der unterschiedlichen Wissensarten dargelegt wurde, stehen bezogen auf diese Arbeit insbesondere die Entdeckung unbekannter Muster in den sequenziellen Abläufen der Produktionsprozesse im Vordergrund. Ebenso ist die Erkennung von Zusammenhängen, die zu einem bestimmten Produktionszustand (z. B. Stillstand) führen, im Fokus. Nachfolgend werden aus diesem Grund die expertenbasierte Mustererkennung sowie die Assoziationsanalyse als Vertreter des Data-Minings mit Fokus auf die Gewinnung von Wissen bzgl. Sequenzen und kontextbezogenem Wissen näher erläutert. Abbildung 27 gibt einen Überblick über die für die Produktionssteuerung relevanten Wissensarten und ordnet diesen mögliche Ansätze zur Mustererkennung zu.

7.3 Mustererkennung für die ereignisorientierte Produktionssteuerung

Mustererkennung Wissensarten	Assoziationsanalyse		Experten	Klassifikation
	Kontext	Sequenz		
Allgemeines Produktionswissen				
Aggregation zu Kennzahlen	○	○	●	○
Wissen bzgl. Sequenzen				
Auftragsabfolge	○	●	○	○
Materialfluss	○	●	○	○
Schichtbezogenes Wissen	○	●	○	○
Kontextbezogenes Wissen				
Ressourcenbezogenes Wissen (Störungen, Produktionsstatus)	●	○	○	○
Produktbezogen (Qualität)	○	○	○	●
Materialbezogen (Menge)	●	○	○	○
Personalbezogenes Wissen	●	○	○	○

Legende:

<p> : Betrachtete Ansätze im Rahmen der Arbeit</p> <p> : Nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit</p>	<p> : ungeeigneter Ansatz</p> <p> : bevorzugter Ansatz</p>
---	--

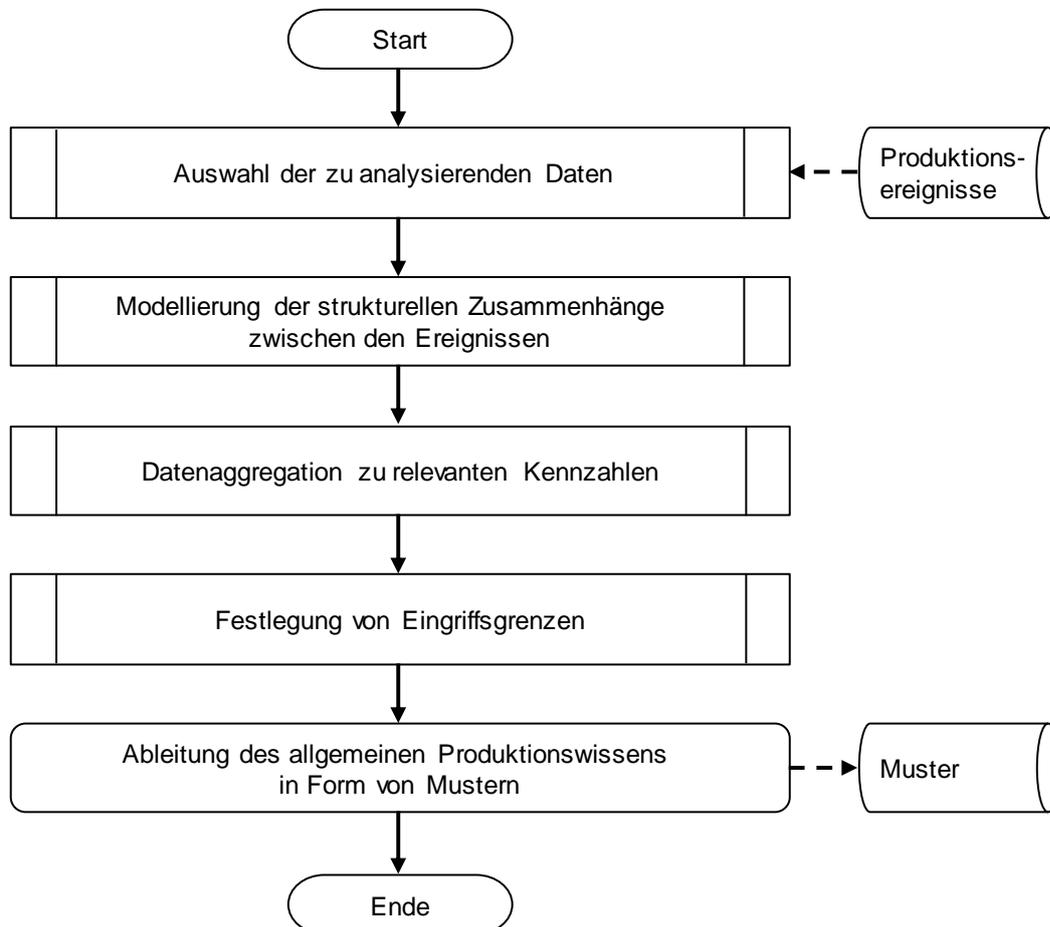
Abbildung 27: Ansätze zur Mustererkennung in Abhängigkeit der Wissensarten

7.3.2 Vorgehen für die erfahrungsbasierte Mustererkennung

Zum Aufbau eines grundlegenden Prozessverständnisses, ist es zunächst sinnvoll, mit der erfahrungsbasierten Mustererkennung zu beginnen. Für eine strukturierte Vorgehensweise empfiehlt sich, wie in Abbildung 28 dargestellt, hierbei der Einsatz der in Kapitel 6 vorgestellten Modellierungsansätze. Dabei kann mithilfe des strukturellen Ereignismodells (vgl. Abschnitt 6.3.2) das Wissen über die relevanten Ereignistypen und deren Zusammenhänge dargestellt und daraus abgeleitet werden. Im Hinblick auf die Produktionssteuerung können insbesondere Regeln abgeleitet werden, die sich durch die Aggregation der einzelnen Sensorwerte von Produkten, Fertigungs- und Betriebsmitteln zu steuerungsrelevanten Kennzahlen

7 Ereignisverarbeitung und -analyse

ergeben. Durch den Abgleich mit Planungsdaten können hierbei die Schwere und die Dringlichkeit der Abweichungsereignisse ermittelt werden und somit Regeln für erforderliche Eingriffe in den Produktionsprozess abgeleitet werden. Diese Art der Ereignisregeln ist eng verknüpft mit der Produktionsregelung.



*Abbildung 28: Vorgehen zur Mustererkennung für
allgemeines Produktionswissen (Darstellung nach DIN 66001)*

Darüber hinaus dient die Modellierung der Abläufe des Produktionsprozesses mit der EPK-Notation (vgl. Abschnitt 6.4) zur Ableitung der logischen, zeitlichen und räumlichen Zusammenhänge. Die kontext- und relationsbasierten Zusammenhänge werden in der Ereignisregelbaumstruktur definiert und können dieser entnommen werden. Die Regeln zur Aggregation stehen in engem Zusammenhang mit den steuerungsrelevanten Kennzahlen. Entsprechend der logistischen Zielpositionierung des Unternehmens müssen Grenzwerte für das Auslösen von Ereig-

nissen definiert werden. Diese können bezogen auf einzelne Stationen, Produktionsabschnitte oder auch Produktfamilien individuell angepasst werden. Hier kann besonders das Erfahrungswissen der Mitarbeiter einfließen und die Schwankungsbreiten und die Grenzwerte können basierend auf der Kritikalität großzügiger oder enger gewählt werden.

Herausforderungen bei der expertenbasierten Mustererkennung stellen die vollumfängliche Erfassung des impliziten Erfahrungswissens in expliziten Regeln dar und das mangelnde Verständnis von Fachexperten für die IT-Systeme sowie die damit verbundene Übersetzung der relevanten Muster in Form von EPL-Codes. Die Einbindung von Experten ist ein wesentlicher Aspekt für die Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen und somit von hoher Relevanz für die daraus resultierende Akzeptanz des Systems durch die Mitarbeiter. Darüber hinaus ist das Wissen der Experten erforderlich für die Ableitung und Überprüfung der durch Ansätze des Data-Minings ermittelten Regeln auf ihre Plausibilität. Zur Entlastung der Mitarbeiter soll demnach, wie in Abbildung 27 dargestellt, der expertenbasierte Ansatz bevorzugt zur Definition der Aggregation von Ereignissen zu Kennzahlen sowie zur Festlegung von Grenzwerten zum Einsatz kommen. Zur Erkennung weitergehender Zusammenhänge sollen Ansätze des Data-Minings eingesetzt werden. Nachfolgend wird das breite Feld möglicher Algorithmen aus dem Bereich des Data-Minings eingegrenzt und näher erläutert.

7.3.3 Vorgehen für die Data-Mining-basierte Mustererkennung

Wie in den Grundlagen in Abschnitt 2.3 erläutert, wird zwischen überwachtem und unüberwachtem Lernen unterschieden. Bei überwachten Verfahren ist das Ergebnis, welches mittels eines zu erstellenden Modells abgebildet werden soll, vorab bekannt. Durch Einsatz des überwachten Verfahrens werden die Modellparameter so angepasst, dass sich eine ausreichende Übereinstimmung zwischen den tatsächlich vorliegenden Werten und den vorhergesagten Werten ergibt (CHAMONI 2006).

Unüberwachte Verfahren werden hingegen eingesetzt, um unbekannt Strukturen in Daten aufzudecken, weshalb der Fokus dieser Arbeit auf den unüberwachten Lernverfahren liegt. Zu den häufig eingesetzten unüberwachten Lernverfahren zählen das Clustering und die Assoziationsanalyse. Der Vorteil unüberwachter Lernverfahren ist, dass vorab (a priori) keine Vorgaben bezüglich der Einteilung der Daten erfolgen müssen. Entsprechend dieser Definition zählt auch die Assoziationsanalyse zum unüberwachten Lernen (LIU 2012). In der Literatur wird die Assoziationsanalyse auch häufig den überwachten Lernverfahren zugeordnet, wird dann jedoch mit dem Ziel der Klassifikation eingesetzt (BRAMBRING 2017). Beim

Clustering liegt der Fokus auf der Zuordnung von Daten zu einer Gruppe von Datenobjekten mit ähnlichen Eigenschaften.

Im Rahmen dieser Arbeit steht hingegen die Aufdeckung von Ähnlichkeiten zwischen Abläufen von Ereignissen im Vordergrund. Aus diesem Grund wird nachfolgend die Assoziationsanalyse näher beleuchtet und hierbei insbesondere der Fokus auf die Ermittlung von sequenziellen Regeln gelegt.

Auswahl der Methoden zur Assoziationsanalyse für eine ereignisorientierte Produktionssteuerung

Ziel der Assoziationsanalyse ist das Entdecken von Beziehungen und Assoziationen zwischen Ausprägungen von Variablen, um somit unbekannte Muster in Datensätzen zu finden. Im Rahmen der Assoziationsanalyse stellt insbesondere das Association Rule Mining (ARM) ein Forschungsgebiet dar, das sich mit der Suche nach starken Regeln in Datensätzen beschäftigt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen die Assoziationsregeln Korrelationen zwischen häufig gemeinsam auftretenden Ereignissen beschreiben. Zentrale Aufgabe der Assoziationsanalyse ist es, wiederkehrende Datenobjekte zu identifizieren und sie in Form von „Wenn-Dann-Regeln“ bzw. „Assoziationsregeln“ darzustellen (ZHANG C. 2002).

Im Hinblick auf die Regeln, die für die Ereignisverarbeitung eingesetzt werden, dienen die Ergebnisse, die durch die Assoziationsanalyse ermittelt werden, nur zur Definition des „Wenn“-Teils der Ereignisregeln. Es steht folglich die Erkennung von Mustern im Vordergrund, womit die Assoziationsregeln nicht gleichzusetzen sind mit den CEP-Regeln. Mithilfe der Assoziationsanalyse können Ursachen für Abweichungen vom Produktionsablauf aufgedeckt werden, z. B. für Störungen, Stillstände oder Warteschlangen im Produktionsprozess. Dementsprechend umfasst der „Dann“-Teil der Assoziationsregeln diese Auswirkungen. Im Gegensatz dazu löst der Aktionsteil der CEP-Regel Aktionen wie das Senden einer Benachrichtigung oder das Aufrufen eines Dienstes aus.

Um den Umgang mit diesen Assoziationsregeln zu vereinfachen, wurde von AGRAWAL ET AL. (1993) ein formales Modell entwickelt, das nachfolgend beschrieben wird. Bei den zu analysierenden Daten handelt es sich um binäre Attribute der Menge $I = \{i_1, i_2, \dots, i_m\}$, welche als Items bezeichnet werden. Zusätzlich werden Transaktionen T betrachtet. Die einzelnen Transaktionen t werden durch Vektoren repräsentiert, die den Wert $t[k] = 1$ annehmen, falls die einzelnen Attribute auftreten, andernfalls gilt $t[k] = 0$.

Eine Assoziationsregel wird durch eine Implikation, wie nachfolgend in Formel (1) dargestellt, beschrieben:

$$X \rightarrow Y, \quad \text{für } X \subset I, Y \subset I \text{ und } X \cap Y = \emptyset \quad (1)$$

Dabei gilt, dass X und Y Untermengen von I sind, welche als „Itemsets“ bezeichnet werden, und dass Y nicht in X enthalten sein darf. Anschaulich gesprochen besagt Formel (1), dass in Transaktionen, welche die Items aus X enthalten mit hoher Wahrscheinlichkeit auch die Items aus Y auftreten (LIU 2012). Für die Auswahl infrage kommender Regeln werden die Maßzahlen „Support“ und „Konfidenz“ berechnet. Der Support gibt Auskunft über die Auftrittswahrscheinlichkeit der von der Regel aufgestellten Bedingung im Hinblick auf die Gesamtzahl an Transaktionen n und berechnet sich nach Formel (2):

$$\text{supp}(X \rightarrow Y) = \frac{(X \cup Y).count}{n} \quad (2)$$

Der Konfidenzwert hingegen gibt die relative Häufigkeit der Fälle an, für die die Regel richtig ist und somit unter den möglichen Alternativen tatsächlich Anwendung findet. Berechnet wird die Konfidenz wie in Formel (3) beschrieben:

$$\text{conf}(X \rightarrow Y) = \frac{(X \cup Y).count}{(X).count} \quad (3)$$

Damit eine Regel als gültig festgelegt werden kann, muss diese die zwei folgenden Bedingungen, wie in Formel (4) und (5) beschrieben, erfüllen:

$$\text{supp}(X \rightarrow Y) \geq \text{minsupp} \quad (4)$$

$$\text{conf}(X \rightarrow Y) \geq \text{minconf} \quad (5)$$

*Min*supp und *min*conf sind Grenzwerte, die von Domänenexperten festgelegt werden müssen (ZHANG 2002). An dieser Stelle wird wiederum deutlich, dass die Regelableitung auch beim Einsatz von Algorithmen nicht unabhängig von Experten definiert werden kann. Methoden für das Rule-Mining können prinzipiell in zwei Schritte unterteilt werden (SHARAFI 2013):

1. Zunächst müssen die „large Itemsets“ identifiziert werden. Das sind alle Itemsets mit einem Support, der über dem angegebenen Grenzwert liegt.

Itemsets, die einen Support unterhalb des Grenzwertes aufweisen, werden als „small Itemsets“ bezeichnet.

2. Large Itemsets werden verwendet, um neue Regeln zu bilden. Dabei können aus einem Itemset durch unterschiedliche Kombination der Items im „Wenn“- und „Dann“-Teil mehrere Regeln gebildet werden. Um als gültige Regel übernommen zu werden, müssen diese eine Konfidenz größer gleich der Grenzkonfidenz besitzen.

Apriori-Algorithmus

Ein weitverbreiteter Ansatz des ARM ist der sog. Apriori-Algorithmus nach AGRAWAL & SORKANT (1994). Der Apriori-Algorithmus arbeitet in zwei Schritten:

1. Finden aller häufigen Itemsets

Im ersten Schritt werden je k -Iteration des Algorithmus die Kandidatenmengen der Länge k betrachtet, die die Anforderungen hinsichtlich minsupp erfüllen. Wenn keine neuen Itemsets mehr gefunden werden, stoppt der Algorithmus und gibt alle häufigen Itemsets aus.

2. Ableitung der Assoziationsregeln aus den häufigen Itemsets

Nachdem die häufigen Itemsets erzeugt wurden, können aus ihnen Regeln extrahiert werden. Dafür werden auf Basis der häufigen Itemsets Regeln abgeleitet. Anschließend wird die Konfidenz der aufgestellten Regel berechnet und überprüft, ob der festgelegte Mindestwert für die Konfidenz (minconf) erfüllt wird.

Die Generierung der Kandidatensets ist besonders bei großen Datenbanken ein zeitaufwändiger Schritt, da er eine hohe Rechenleistung beansprucht (PETERSOHN 2005).

FP-Growth Algorithmus

Ein weiterer Ansatz des ARM ist der Frequent Pattern (FP)-Growth Algorithmus. Das Ablaufschema des FP-Growth Algorithmus kann in zwei grundlegende Schritte unterteilt werden:

1. Aus allen Transaktionen der Datenbank wird ein Frequent Pattern Tree (FP-Baum) aufgebaut.
2. Ein rekursiver Algorithmus extrahiert aus dem erzeugten FP-Baum alle large Itemsets.

Um den FP-Baum zu erstellen, wird zunächst die gesamte Datenbank gescannt zur Bestimmung der relativen Häufigkeiten der Items. Es werden Itemsets betrachtet

und die relative Häufigkeit einzelner Items berechnet. Falls die Items einen festgelegten Mindestsupport nicht erfüllen, werden diese Items entfernt. Die verbleibenden Itemsets werden absteigend nach der relativen Häufigkeit der enthaltenen Items geordnet. Die sortierten Itemsets werden als Pattern bezeichnet. Durch das Übertragen der Patterns wird der FP-Baum erstellt. Nach dem Erstellen des FP-Baums können nun mithilfe eines rekursiven Algorithmus die large Itemsets aus dem Baum extrahiert werden. Begonnen wird mit dem Item, das die niedrigste Priorität nach der Bestimmung des Supports hat. Aus allen Patterns und deren Kombinationen, die den Mindestsupport erfüllen, kann der reduzierte FP-Baum erstellt werden. Sollte eines der Patterns den Mindestsupport bereits ohne Kombinationen erfüllen, wird es direkt in den reduzierten FP-Baum übernommen. (CLEVE & LÄMMEL 2014)

Ein großer Vorteil des FP-Growth Algorithmus ist, dass im Vergleich zum Apriori-Algorithmus keine Kandidatensets generiert werden müssen und die gesamte Datenbank daher nur ein einziges Mal zu Beginn des Verfahrens gescannt wird. Für die nachfolgenden Schritte entfällt ein Datenbankschscan, was die Laufzeit des FP-Growth Algorithmus gegenüber dem Apriori-Algorithmus verkürzt (CLEVE & LÄMMEL 2016). Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit der von HAN ET AL. (2000) entwickelte FP-Growth Algorithmus für die Mustererkennung verwendet.

Evolutionäre Algorithmen

ARM kann auch als multikriterielles Optimierungsproblem aufgefasst werden. Die einzelnen Elemente, aus denen sich eine Assoziationsregel bzw. der Bedingungsteil einer CEP zusammensetzen, werden dabei so angepasst, dass sich eine Regel ergibt, die die vorab definierte Fitnessfunktion erfüllt. Aus diesem Grund werden aktuell in zahlreichen Forschungsarbeiten evolutionäre Algorithmen, wie Genetische Algorithmen (GA) (INDIRA & KANMANI 2011), Partikelschwarmoptimierung (PSO) (TAHYUDIN & NAMBO 2017) oder der Fledermausalgorithmus (HERAGUEMI ET AL. 2015), zur Verbesserung der Performanz und für den Umgang mit numerischen Daten im Bereich des ARM untersucht. Damit diese Ansätze Regeln entwickeln, die passend sind und lernen können werden jedoch Trainingsdatensätze benötigt. So müssen initiale, von Experten definierte Regeln festgelegt werden. Es handelt sich also um Ansätze des überwachten Lernens. Aus diesem Grund wurde der Einsatz von evolutionären Algorithmen für den Bereich der Produkti-

onssteuerung im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt. Evolutionäre Algorithmen können aber beispielsweise eingesetzt werden, wenn relevante Regeln gefunden worden sind, um die initialen Regeln weiter zu optimieren.

Sequenzielle Assoziationsanalyse

Die bisher erläuterten Algorithmen berücksichtigen keine sequenziellen oder zeitlichen Zusammenhänge. Dies ist aber insbesondere im Hinblick auf die Produktionssteuerung von Interesse. Aus diesem Grund wird nachfolgend auch ein Algorithmus für die Entdeckung sequenzieller Assoziationsregeln betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Berücksichtigung der Reihenfolge des Auftretens der Ereignisse. Dies ist beispielsweise für die Analyse von Auftragsabfolge betreffenden Zusammenhängen relevant. Im Bereich des Sequential Pattern Minings wurden zahlreiche Algorithmen entwickelt, die sich in ihrer Effizienz unterscheiden (FOURNIER-VIGER ET AL. 2017). Für die vorliegende Arbeit wurde der nachfolgend erläuterte Algorithmus ausgewählt, da dieser etabliert ist und somit für die Mustererkennung im Rahmen der Ereignisorientierung eingesetzt werden kann.

GSP-Algorithmus

Der Generalized Sequential Patterns (GSP)-Algorithmus beruht auf dem Apriori-Algorithmus und ist einer der bekanntesten Algorithmen für das Sequential Pattern Mining. Beim GSP-Algorithmus werden die Muster anhand ihres Supports, der die Häufigkeit ihres Auftretens bezogen auf die Anzahl der untersuchten Sequenzen wiedergibt, bewertet. Hierzu werden in mehreren k -Iterationen Sequenzen der Länge k erzeugt und deren Support berechnet und mit dem Mindestsupport verglichen. Falls der Mindestsupport nicht erfüllt wird, werden die Sequenzen entfernt. Die Kandidaten je k -Iterationsschritt werden dabei durch Vereinigung der häufigen Sequenzen aus dem vorausgegangen Iterationsschritt ($k - 1$) erstellt. Das Verfahren wird solange wiederholt bis alle häufigen Sequenzen, die den Mindestsupport erfüllen, gefunden wurden. (LIU 2012)

Vorgehen zur Mustererkennung für kontextbezogenes Wissen und Wissen bzgl. der Sequenzen

Auf Basis der ausgeführten Eigenschaften sowie Einsatzgebiete der unterschiedlichen Methoden zur Assoziationsanalyse leitet sich die Auswahl der passenden Algorithmen zur Erkennung von unbekanntem Mustern in den Datensätzen ab. Folglich wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit der FP-Growth Algorithmus zur Ermittlung von kontextbezogenem Wissen eingesetzt und der GSP-Algorithmus zur

7.3 Mustererkennung für die ereignisorientierte Produktionssteuerung

Erkennung von sequenziellen Zusammenhängen angewandt. Nachfolgende Abbildung 29 gibt einen Überblick über den Ablauf der Vorgehensweise zur Umsetzung der Algorithmen für die Mustererkennung.

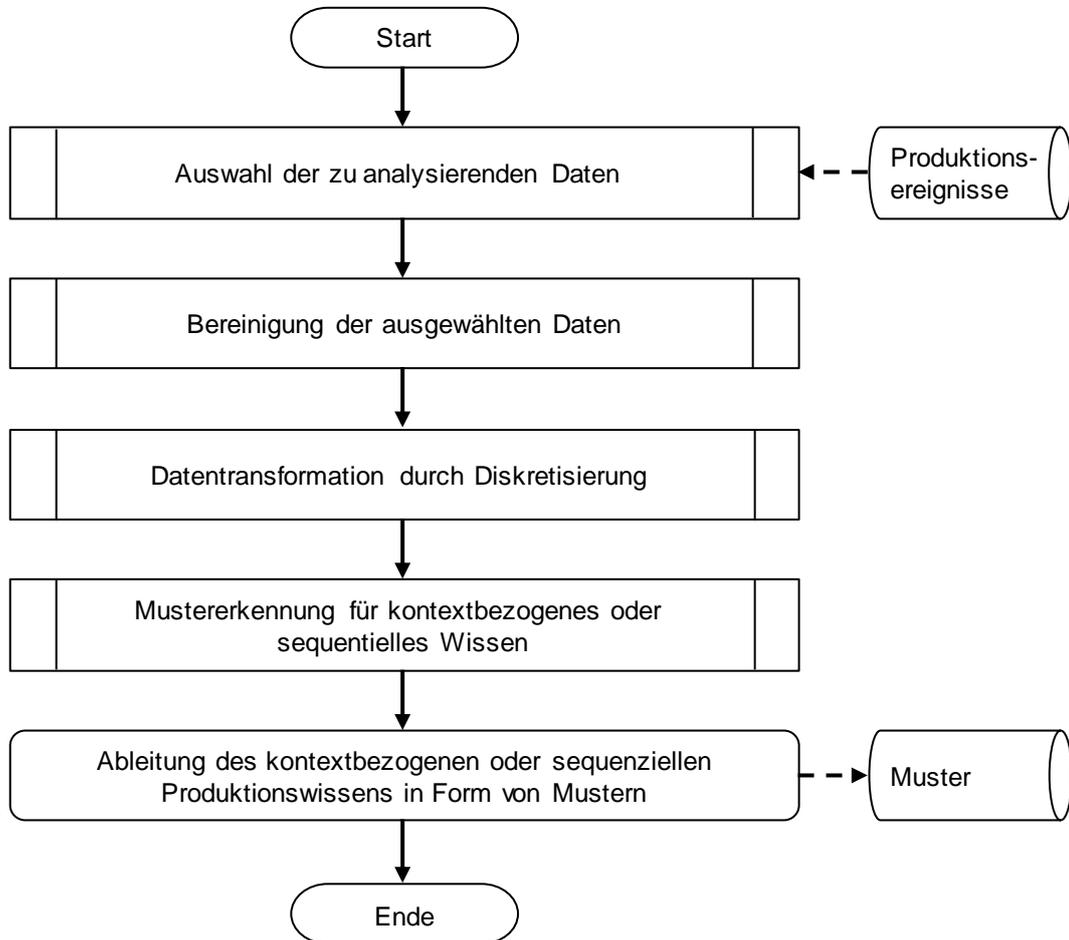


Abbildung 29: Vorgehen zur Mustererkennung für kontextbezogenes Wissen und Wissen bzgl. der Sequenzen (Darstellung nach DIN 66001)

Zunächst werden die zu analysierenden Daten ausgewählt und bereinigt. Die beiden für die Mustererkennung ausgewählten Algorithmen der Assoziationsanalyse zur Extraktion von kontextbezogenem Wissen und Wissen bzgl. der Sequenzen können lediglich binomiale Daten verarbeiten. Dies stellt eine starke Einschränkung im Hinblick auf den Einsatz für die Produktionssteuerung dar. Die zu untersuchenden Daten müssen aus diesem Grund für die Datenanalyse ergänzend zur Datenbereinigung diskretisiert werden. Für die Mustererkennung werden die bereinigten und transformierten Daten herangezogen und auf dieser Basis wird das kontextbezogene und sequentielle Wissen in Form von Mustern abgeleitet.

7.3.4 Definition von Eingriffsgrenzen

Die Ereignisströme aus der Datenverarbeitung werden als Eingangsdaten für EPA genutzt, in denen Regeln für die Kennzahlenanalyse hinterlegt sind. Innerhalb des EPAs werden Muster erkannt, sodass als Ausgangsstrom des EPAs aggregierte Ereignisse ausgegeben werden, die aufgrund der vorgegebenen Ereignisregeln erzeugt wurden. So kann beispielweise die Unterschreitung eines vorgegebenen Soll-Werts einer Kennzahl durch eine Ereignisregel erkannt werden und als identifiziertes Ereignis mit einem höheren Informationsgehalt weitergegeben werden. Auf Basis dieser identifizierten Ereignisse können Maßnahmen zur Steuerung abgeleitet werden (vgl. Kapitel 8).

Mit dem *Soll-Ist-Vergleich* lässt sich die Zielerreichung durch die Gegenüberstellung der gemessenen Ist-Werte mit den vorgegebenen Soll-Werten überprüfen (GLADEN 2011). Maßnahmen sind einzuleiten, sobald unzulässige Abweichungen vorliegen. Voraussetzung für einen aussagekräftigen Soll-Ist-Vergleich ist die Vorgabe passender Soll-Werte. Soll-Werte können auf Basis von Erfahrungswissen durch Experten vorgegeben werden. Die Vorgabe der Soll-Werte allein durch Vergangenheitswerte desselben Prozesses ist nicht optimal, da unklar ist, ob diese Vergleichswerte ein Optimum darstellen oder weitere Verbesserungen möglich sind. Aus diesem Grund erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Definition der Eingriffsgrenzen durch Experten, die diese im Sinne der Unternehmensziele festlegen. Um ein aggregiertes Ereignis auf Basis der aktuellen Produktionssituation abzuleiten, müssen die relevanten Ereignisse erfasst und die Abweichung zu den Planwerten ermittelt und überwacht werden.

Es muss sowohl ein Soll-Wert als auch eine definierte Eingriffsgrenze für jede Zielgröße festgelegt werden. Der Soll-Wert beschreibt hierbei den gewünschten optimalen Zustand einer Zielgröße, der im Falle eines störungsfreien Produktionsverlaufs vorliegt. Die Eingriffsgrenze definiert einen je Zielgröße individuell festgelegten Wert und signalisiert, ab wann eine Handlung erforderlich bzw. erwünscht ist (vgl. Abbildung 30). Wird diese Grenze im Verlauf der Produktion erreicht oder überschritten, so werden Gegenmaßnahmen eingeleitet, um die Ausgangssituation wiederherzustellen.

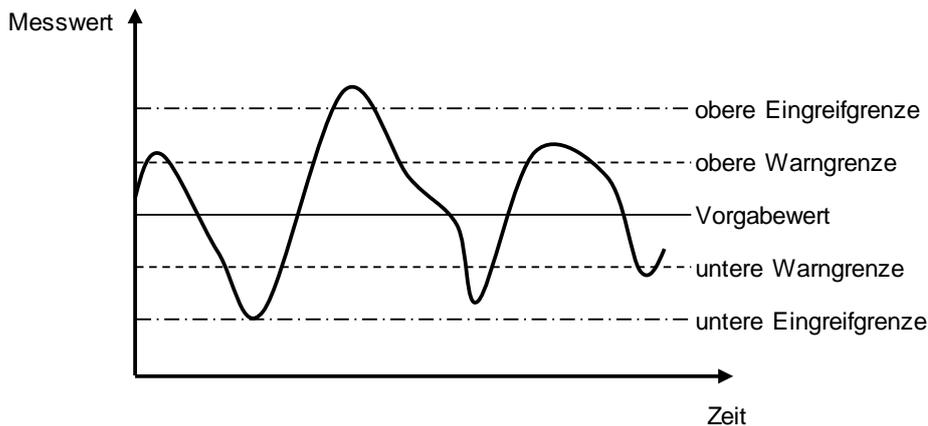


Abbildung 30: Darstellung der Eingriffsgrenzen in Anlehnung an SIMON (1995)

Bei der Festlegung der Eingriffsgrenzen ist es wichtig, diese abhängig von der Stabilität der Produktionsprozesse in einer passenden Entfernung zu den geplanten Soll-Werten anzuordnen (LÖDDING 2016). Je unstabiler Prozesse sind, desto größeren Schwankungen unterliegen die gemessenen Kenngrößen. Um in diesem Fall einem zu nervösen Eingreifen der Steuerungsmethoden vorzubeugen, sind die Eingriffsgrenzen entsprechend anzupassen. Die Grenzen werden hierbei anhand der Standardabweichung über die Formel (6) berechnet nach SIMON (1995).

$$S = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

- mit S Standardabweichung
 x aktueller Messwert
 \bar{x} Mittelwert
 n Anzahl der Messungen

Zur Dokumentation werden die berechneten Grenzen anschließend in Kennzahlentemplates festgehalten. Um die Anforderung der Eindeutigkeit und Interpretierbarkeit der Kennzahlen zu erfüllen, muss für die Kennzahldefinition eine passende Referenzbeschreibung zur Verfügung gestellt werden. Neben der Sicherstellung der korrekten und wiederholbaren Berechnung der einzelnen Kennzahlen dient dieses Template auch zur Information für die Anwender. In Abbildung 31 ist der

7 Ereignisverarbeitung und -analyse

Aufbau eines solchen Templates dargestellt und beispielhaft für die Kennzahl *Liefertermintreue* ausgefüllt. Hierbei wurden einige Aspekte des Definitionsblattes aus der VDI-Richtlinie 4400 Blatt 2 genutzt.

Nr. LS 1	Kennzahlbezeichnung Liefertermintreue	Ziel Hoher Lieferservice
Formel $T = \frac{\text{Anzahl pünktlicher Aufträge}}{\text{Anzahl Aufträge}}$		Einheit %
Zweck Die Kennzahl dient der Messung des Ziels hoher Lieferservice und der Analyse der Termineinhaltung. Die Kennzahl kann nur verwendet werden, wenn Endtermine für Aufträge vergeben werden.		
Beschreibung der Formelbestandteile Die Anzahl pünktlicher Lieferungen umfasst alle zum vorgegebenen Zeitpunkt abgeschlossenen Aufträge. Diese wird mit der Gesamtheit aller im Betrachtungszeitraum bearbeiteten Aufträge in Beziehung gesetzt.		
Datenquelle ERP-System, BDE-System		
Bewertung		
Wertebereich		0–100 %
Vorgabewert		90 %
Obere Eingriffsgrenze		-
Untere Eingriffsgrenze		80 %
Auswertungszeitraum/Bezug Durchschnittswert je Schicht		Updatefrequenz laufend

Abbildung 31: Beispiel eines ausgefüllten Kennzahlentemplates

Jede Kennzahl wird durch eine Identifikationsnummer eindeutig gekennzeichnet und kann dadurch innerhalb des Kennzahlensystems klassifiziert werden. Die Kennzahl soll aussagekräftig bezeichnet werden, sodass ein Rückschluss auf den Zweck der Kennzahl und das damit verbundene Ziel möglich ist. Die Angabe des formelmäßigen Zusammenhangs gibt vor, wie die einzelnen Formelbestandteile bei der Berechnung der Kennzahl zueinander in Beziehung gesetzt werden müssen. Für die Vergleichbarkeit einzelner Werte ist zudem die Einheit der Kennzahl von hoher Relevanz. Ebenso werden im Template die Datenquellen, welche die

zur Berechnung der Kennzahl erforderlichen Informationen enthalten, dokumentiert. Als Grundlage für die Interpretation der jeweiligen Kennzahl wird die Bewertung der Kennzahl herangezogen. Hierzu werden der zu erwartende Wertebereich sowie der Vorgabewert und die Eingriffsgrenzen definiert. Durch den Auswertungszeitraum wird der Zeitbezug der Kennzahlen festgelegt, dabei können die Kennzahlen z. B. bedarfsorientiert, periodisch oder online ausgewertet werden. Darüber hinaus wird durch den Bezug vorgegeben, ob beispielsweise ein Durchschnittswert über den Zeitraum gebildet werden soll oder Maximal- bzw. Minimalwerte ausgegeben werden sollen. Schließlich gibt die Updatefrequenz vor, in welchem Intervall eine Kennzahl neu berechnet und aktualisiert ausgegeben werden soll.

7.4 Fazit

Innerhalb des vorliegenden Kapitels wurde die ereignisorientierte Referenzarchitektur entwickelt. Dabei wurden die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Elemente für die Ereignisverarbeitung und die Regelableitung näher erläutert.

Bei der Ereignisverarbeitung ist auf eine ausreichende Modularisierung und Priorisierung der EPA zu achten, um die erforderlichen Reaktionszeiten sicherstellen zu können. Für die Definition der Regelbasis wird zudem ein iteratives Vorgehen für die Regelableitung vorgesehen. Auf Basis historischer Daten sollen neue Muster und Erkenntnisse gewonnen werden, die dann in die Ereignisverarbeitung einfließen.

Ein grundlegender Schritt für die Regelableitung ist die Mustererkennung. Mithilfe der in Kapitel 6 entwickelten Modellierungsansätze kann die expertenbasierte Mustererkennung entsprechend strukturiert durchgeführt werden. Zusätzlich wurde aufgezeigt, dass zur Erkennung unbekannter Muster in den Produktionsdaten Algorithmen aus dem Bereich der Assoziationsanalyse zu einer Unterstützung der Experten dienen können. Hierbei wurden die Bedingungen für die Auswahl eines passenden Ansatzes für die Mustererkennung erläutert. Bei einer mangelnden Datenverfügbarkeit kann kein Data-Mining-Ansatz durchgeführt werden. Ist dies der Fall, so muss auf alternative Ansätze (z. B. modell- oder erfahrungsbasiert) für die Mustererkennung zurückgegriffen werden. Zudem wurde im Rahmen dieses Kapitels vertieft auf die Wissensarten, die für die Produktionssteuerung relevant sind, eingegangen. Diese wurden anhand ihrer Eigenschaften kategorisiert

7 Ereignisverarbeitung und -analyse

und mit den Elementen des Bedingungsteils der Ereignisregeln (z. B. Sequenzen, Kontext, Aggregation) in Beziehung gesetzt.

Im Rahmen der Datenanalyse steht eine Vielzahl unterschiedlicher Algorithmen zur Verfügung. Für die vorliegende Arbeit wurde der Fokus auf die Erkennung von unbekanntem Mustern in den Datensätzen gelegt und somit der Betrachtungsbereich auf das unüberwachte Lernen beschränkt. Es wurde dargelegt, dass sich für diese Art der Mustererkennung die Assoziationsanalyse eignet. Mit dem FP-Growth Algorithmus und dem GSP-Algorithmus wurden zwei etablierte Algorithmen ausgewählt, die im Rahmen dieser Arbeit für die Analyse der Produktionsdaten zum Einsatz kommen.

Im vorliegenden Kapitel wurde zudem aufgezeigt, wie aggregierte Ereignisse, die eine steuerungsrelevante Reaktion nach sich ziehen, anhand der Definition von Eingriffsgrenzen erkannt werden können, die eine steuerungsrelevante Reaktion nach sich ziehen. Dies stellt den Ausgangspunkt für die nachfolgend entwickelte Maßnahmenableitung dar.

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

8.1 Allgemeines

Ein zentraler Baustein des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Systems ist die Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung. Die Methode soll die echtzeitfähige Verarbeitung der Ereignisse zur Entscheidungsunterstützung basierend auf Regeln ermöglichen. Der Fokus der Methode liegt auf der Gestaltung der Ereignisbehandlung. In Abhängigkeit von den Auswirkungen der eintretenden Ereignisse sollen passende Reaktionen ausgewählt und Steuerungsentscheidungen weitgehend automatisiert getroffen werden. In den nachfolgenden Abschnitten werden der grundsätzliche Ablauf sowie die einzelnen Schritte der Methode näher beschrieben.

8.2 Ablauf der Methode

Die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Methode dient der ereignisbasierten Produktionssteuerung, indem auftretende Ereignisse in der Produktion identifiziert und dadurch passende Reaktionen initiiert werden, die eine Verarbeitung und Behandlung der Ereignisse ermöglichen. Der Ablauf des Verfahrens ist in Abbildung 32 dargestellt. Die Methode besteht aus den drei Schritten *Maßnahmeninitiierung*, *Maßnahmengenerierung* sowie *Maßnahmenpriorisierung und -auswahl*.

Im Rahmen der *Maßnahmeninitiierung* sind die produktionsrelevanten Ereignisse hinsichtlich ihres Auftretens und deren Auswirkungen auf die Produktion zu klassifizieren. Die Auswirkungen schlagen sich in den logistischen und sensorbasierten Kennzahlen nieder. Anhand der Veränderungen der Kennzahlen und mithilfe des zu erwartenden Schadenswertes können die Auswirkungen der Ereignisse bewertet werden. Auf Basis der Ereignisart und der Bewertung der Auswirkungen der Ereignisse können die Struktur der Ereignisverarbeitung (EPA/EPN) und der empfohlene Automatisierungsgrad bestimmt werden. Zur quantitativen Bewertung des Ausmaßes der Auswirkungen von Ereignissen kann der Schadenswert herangezogen werden. Dieser setzt sich aus den beiden Komponenten Dringlichkeit und Schwere zusammen und berücksichtigt somit die Anzahl der betroffenen Produktionsfaktoren und die zu erwartenden zeitlichen Auswirkungen.

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

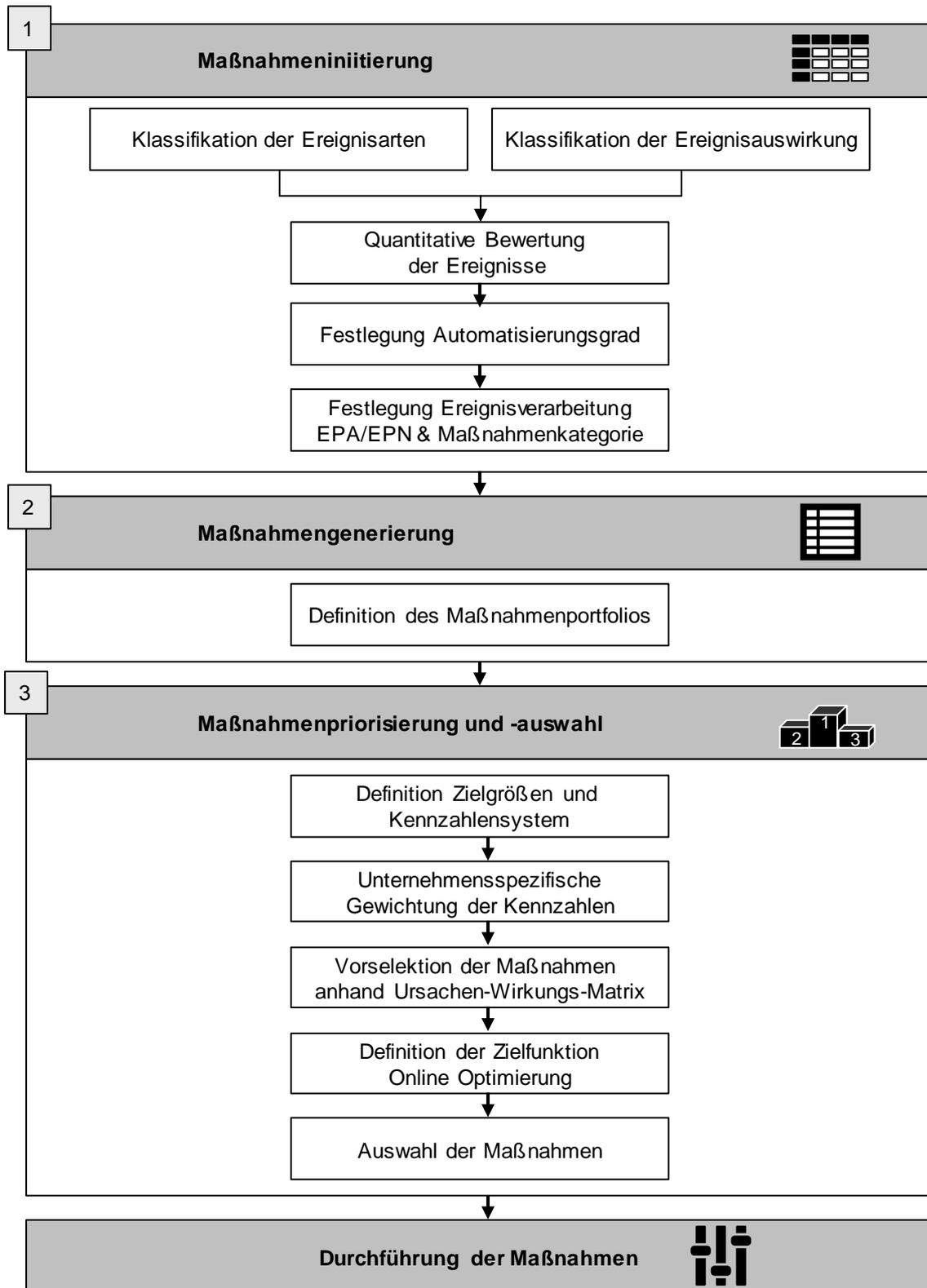


Abbildung 32: Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung
in Anlehnung an PIELMEIER ET AL. (2018c)

Mit einer passenden Handlungsmaßnahme wird auf das eingetretene Ereignis reagiert, um diese Auswirkungen gering zu halten. Für die Umsetzung der Maßnahmen gilt es, den passenden Automatisierungsgrad basierend auf der Klassifikation der Ereignisart und -auswirkung zu wählen.

Im Hinblick auf die zur Verfügung stehenden Maßnahmen kann zwischen der Ereignisverarbeitung – direkte Reaktion auf ein Ereignis aufgrund einer hinterlegten fixen Regel – und der Ereignisbehandlung – Reaktion wird durch ein Anwendungssystem situationsspezifisch ausgelöst – unterschieden werden. Maßnahmen für die Ereignisbehandlung fokussieren im Rahmen dieser Arbeit den Bereich der Produktionssteuerung (Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung) und beziehen sich demnach auf einen kurzfristigen Planungshorizont, der eine kurze Reaktionszeit erlaubt.

Im Zuge der *Maßnahmengenerierung* werden die Maßnahmen in Form eines Maßnahmenportfolios dokumentiert. Für die Auswahl der passenden Maßnahmen muss ein Kennzahlensystem definiert werden und die Kennzahlen unternehmensspezifisch gewichtet werden. Für eine Vorselektion der Maßnahmen werden die Einflüsse der Maßnahmen auf die Kennzahlen in Form einer Ursache-Wirkungs-Matrix zueinander in Beziehung gestellt.

Die *Maßnahmenpriorisierung und -auswahl* erfolgen abschließend auf Basis der Ergebnisse der Optimierung und durch die Betrachtung der Einflüsse der Maßnahmen auf die Zielgrößen, wodurch eine ereignisbasierte Entscheidungsunterstützung realisiert werden kann. Als Folge des Eintretens der Ereignisse werden ebenso wie durch das Ergreifen von Maßnahmen Kosten verursacht. Durch den Einsatz des passenden Optimierungsverfahrens sollen die verursachten Mehrkosten minimiert werden.

8.3 Maßnahmeninitiierung

8.3.1 Klassifikation der Ereignisarten

Die Ereignisse können im Produktionskontext hinsichtlich der Ursachen ihres Auftretens in unterschiedliche Kategorien eingeordnet werden. Die Klassifizierung erfolgt im Rahmen der vorliegenden Arbeit anhand von sechs Kategorien, die in Abbildung 33 dargestellt sind und im Folgenden erläutert werden. Die Kategorien

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

beziehen sich auf die Eigenschaften: Produktionsfaktor, Ursache-Wirkungs-Beziehung, Auftrittshäufigkeit, Entdeckungswahrscheinlichkeit, Erzeugungs- und Erfassungsart und Gefährdungspotenzial.

Klassifikation von Ereignisarten		
Produktionsfaktor	Auftrittshäufigkeit	Erzeugung- und Erfassungsart
<ul style="list-style-type: none"> • Betriebsmittel • Werkstoffe • Aufträge • Mitarbeiter 	<ul style="list-style-type: none"> • Häufig/selten • Erwartet/unerwartet 	<ul style="list-style-type: none"> • Virtuell/real • Automatisiert/manuell
Gefährdungspotenzial	Entdeckungswahrscheinlichkeit	Ursache-Wirkungs-Beziehung
<ul style="list-style-type: none"> • Kritisch/unkritisch 	<ul style="list-style-type: none"> • Mustererkennung • Konfidenz 	<ul style="list-style-type: none"> • Intern/extern • Direkt/indirekt

Abbildung 33: Ereignisarten und deren Einfluss auf die Maßnahmeninitiierung

Art des Produktionsfaktors

Die Aufgliederung der Auslöser orientiert sich an den nach GUTENBERG vorkommenden Produktionsfaktoren in der Produktion (ALISCH ET AL. 2004). So sind hinsichtlich der Produktionssteuerung die Elemente Betriebsmittel, Werkstoffe und Mitarbeiter relevant. Zudem werden Aufträge als zusätzliche Auslösungsart in diese Kategorie aufgenommen.

Auftrittshäufigkeit

Die Auftrittshäufigkeit gibt an, wie oft ein Ereignis zu erwarten ist. Treten Ereignisse häufig auf, so können diese auch als erwartete Ereignisse bezeichnet werden und darauf basierend passende Regeln definiert und hinterlegt werden. Die Auftrittshäufigkeit bezieht sich auf die im Rahmen der Mustererkennung definierte Kennzahl des Supports. Im Gegensatz dazu stehen Ereignisse, die nur selten auftreten. Durch das vereinzelte Vorkommen der Ereignisse ist schwer vorherzusagen, wann sie sich ereignen, weshalb das Auftreten meist unerwartet ist. Entsteht das Ereignis jedoch in einem bestimmten Rhythmus, kann es trotz seltenem Auftreten erwartet werden. Zudem kann es sich auch um ein neu auftretendes Ereignis handeln, sodass der Prozess der Mustererkennung durchlaufen werden muss, um eine neue Regel zu definieren.

Erzeugungs- und Erfassungsart

Des Weiteren hat auch die Erzeugungsart des Ereignisses, die entweder virtuell oder real sein kann, einen Einfluss auf die Maßnahmeninitiierung. Ein Ereignis wird als virtuell entstanden eingestuft, wenn dieses durch die Verwendung von

z. B. Software oder Simulationen erzeugt wird. Als typische Beispiele für reale Ereignisse sind hingegen der Ausfall von Maschinen, Stillstände, das Wachstum von Beständen oder der Abbruch der Materialversorgung zu nennen. Zudem kann zwischen einer automatischen Detektion und einer manuellen Aufnahme unterschieden werden. Die Informationen werden beispielsweise von Auto-ID-Systemen oder BDE/MDE aufgenommen und können anschließend direkt analysiert oder nach der Zusammenführung mit anderen Informationen zu Kennzahlen aggregiert werden. Dies gilt ebenso für virtuell erzeugte Ereignisse. Im Gegensatz bzw. ergänzend hierzu steht die manuelle Aufnahme von Ereignissen. Diese wird durch einen Mitarbeiter erfasst und über entsprechende Wege (z. B. Telefon, persönlich, E-Mail) weitergeleitet. Dabei liegt insgesamt ein geringerer Automatisierungsgrad vor. Die Erzeugungs- und die Erfassungsart haben somit anwendungsfallbezogen einen Einfluss auf den Automatisierungsgrad der Maßnahmeninitiierung.

Gefährdungspotenzial

Ereignisse können darüber hinaus auch hinsichtlich ihres Gefährdungspotenzials eingeordnet werden. Die Gefährdung, die von einer Maschine ausgeht, kann beispielsweise über eine Gefährdungsbeurteilung oder Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) festgestellt werden, wodurch auch die Kritikalität eines auftretenden Ereignisses eingestuft werden kann. Somit hat das Gefährdungspotenzial einen Einfluss auf die Gestaltung des EPN und die Priorisierung von Regeln. Zudem können Ereignisse mit Gefährdungspotenzial entsprechend reaktionsschnell und automatisiert behandelt werden.

Entdeckungswahrscheinlichkeit

Im Gegensatz zu den bisher betrachteten Kategorien, die sich u. a. mit der Häufigkeit oder dem zeitlichen Rhythmus eines Ereignisses beschäftigt haben, bezieht sich die Kategorie der Entdeckungswahrscheinlichkeit auf die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis richtig erkannt wird. Das Muster muss in der Regel korrekt hinterlegt sein. Ein Indikator für die Entdeckungswahrscheinlichkeit ist die im Rahmen der Mustererkennung eingeführte Kennzahl der Konfidenz.

Ursache-Wirkungs-Beziehung

Die Ursache und die Wirkung, die durch eine Zustandsänderung im Produktionsprozess aufgrund eines erzeugten Ereignisses dokumentiert werden, können in einem mittelbaren oder unmittelbaren Zusammenhang zueinanderstehen. Es kann unterschieden werden, ob ein direkter oder ein indirekter Zusammenhang zwischen den Ursachen und den Ereignissen besteht.

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Ein direkter Bezug liegt vor, wenn bei der Betrachtung des Ereignisses eine unmittelbare Nähe zum Ursprung der Ursache festzustellen ist. Weiten sich die Auswirkungen dagegen über die Quelle hinweg auf weitere Faktoren aus, liegt ein indirekter Zusammenhang vor. Tritt beispielsweise ein Störfall bei einer Engpassmaschine auf, so steht der Ausfall dieser Maschine in direktem Bezug zu der Ursache. Die sinkende Auslastung nachgelagerter Maschinen, die nicht mehr mit Material versorgt werden, oder der Anstieg der Bestände in den Zwischenpuffern stehen in einem indirekten Zusammenhang zu diesem Ereignis. Ziel der ereignisorientierten Produktionssteuerung ist es, auf Ereignisse, die einen direkten Bezug haben, zeitnah zu reagieren und somit die weiteren indirekten Auswirkungen zu vermeiden. Dementsprechend müssen Regeln formuliert und priorisiert werden, die direkte Ursache-Wirkungs-Beziehungen behandeln.

In diesem Zusammenhang kann zudem unterschieden werden, ob dem Ereignis eine interne oder externe Ursache zugrunde liegt. Interne Ereignisse beziehen sich auf Vorfälle, deren Ursprung innerhalb des Unternehmens liegt. Externe Ereignisse bezeichnen hingegen Vorfälle, die ihren Ursprung außerhalb des Unternehmens haben, sich aber im weiteren Verlauf auf den Produktionsprozess bzw. das Unternehmen auswirken. Auf interne Ereignisse kann begründet durch den Entstehungsort generell ein größerer Einfluss vom Unternehmen ausgeübt werden.

Die Berücksichtigung der unterschiedlichen Arten des Auftretens der produktionsrelevanten Ereignisse ist eine grundlegende Voraussetzung für die Festlegung der Struktur der Ereignisverarbeitung sowie des Automatisierungsgrades der Maßnahmeninitiierung. Zudem gilt es, hierfür auch die Auswirkungen der Ereignisse einzubeziehen und wie nachfolgend beschrieben zu klassifizieren.

8.3.2 Klassifikation der Ereignisauswirkungen

Im vorliegenden Abschnitt werden die Auswirkungen auf die Produktion und folglich auch auf das Unternehmen betrachtet, die sich durch den Eintritt der Ereignisse ergeben können. Die Auswirkungen auf die Produktion werden dabei in vier Kategorien unterteilt. Die Ereignisse wirken sich in Form von Abweichungen des Produktionsablaufs, der Nachfrage, der Kapazität und der Qualität aus (siehe Abbildung 34).

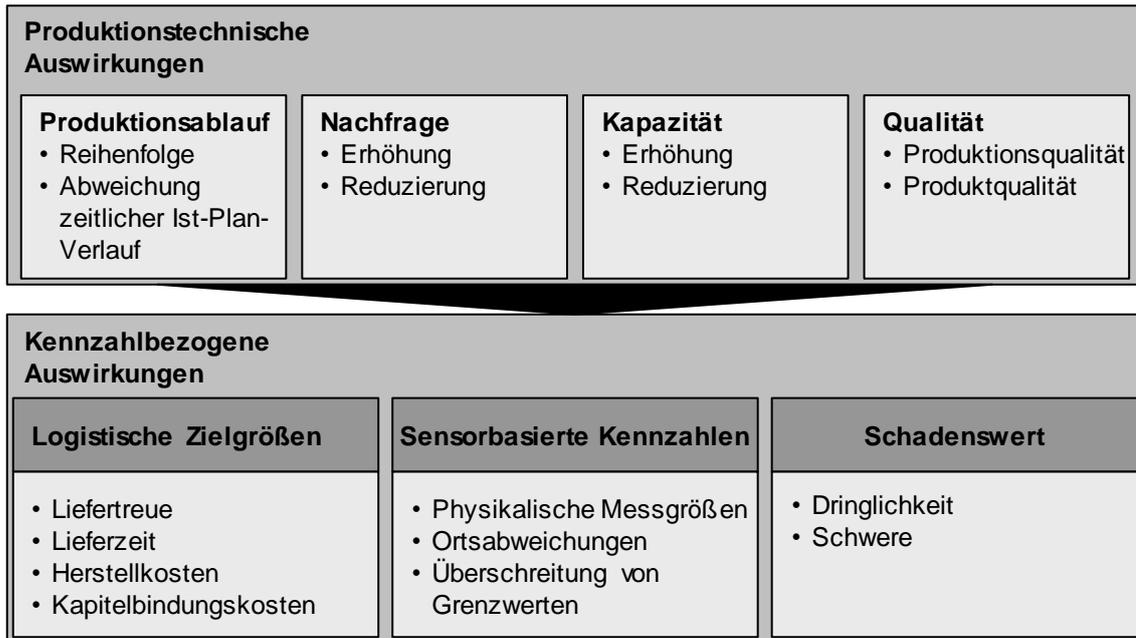


Abbildung 34: Auswirkungen von Ereignissen

Produktionsablauf

Veränderungen der geplanten Auftragsreihenfolge, Verschiebungen von Startzeitpunkten sowie Abweichungen von geplanten Bearbeitungszeiten führen zu Abweichungen zwischen dem Plan- und Ist-Ablauf in der Produktion. Die Abweichungen im Produktionsablauf haben direkte Auswirkungen auf die logistischen Zielgrößen. Um den Auswirkungen entgegenzuwirken, können Maßnahmen wie die Änderung der Auftragsreihenfolge und der Freigabezeitpunkte der Aufträge vorgenommen werden. Diese müssen situationsbezogen ausgewählt werden.

Die genannten Auswirkungen der Ereignisse spiegeln sich direkt in den Kennzahlen wider. Hierbei kann zwischen logistischen Kenngrößen und Kennzahlen, die mit physikalischen Messgrößen oder beispielsweise Ortsabweichungen bei der Lokalisierung in Verbindung stehen, unterschieden werden.

Nachfrage

Eilaufträge, Umplanungen von Aufträgen, Nacharbeit, zusätzliche oder wegzulassende Arbeitsgänge sowie fehlerhafte Stammdaten können Ursachen für eine Reduzierung oder Erhöhung der Kapazitätsnachfrage sein. Die Auswirkungen schlagen sich direkt in den logistischen Kennzahlen nieder, sodass Reaktionen auf Basis der aktuellen Bedingungen ausgewählt werden müssen.

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Kapazität

Die Kapazität wird im Laufe der Produktion durch auftretende Ereignisse wie beispielsweise dem Ausfall von Anlagen oder abwesenden Mitarbeitern maßgeblich beeinflusst. Ereignisse in der Produktion wirken sich somit auf die zur Verfügung stehenden Kapazitäten der Produktionsfaktoren aus. Im Fall einer Kapazitätsreduzierung besteht die Gefahr, dass die angestrebte Termintreue nicht erreicht werden kann, da sich die DLZ erhöht und Aufträge folglich nicht mehr termingerecht an Kunden ausgeliefert werden können. Um zielgerichtet bei derartigen Ereignissen eingreifen zu können, müssen Eingriffsgrenzen für Abweichungen von der maximalen Kapazität definiert werden, da Abweichungen von der geplanten Kapazität einen starken Einfluss auf die logistischen Zielgrößen haben und Reaktionen situationsabhängig mithilfe eines Anwendungssystems ermittelt werden müssen.

Qualität

Spezifische Qualitätsmerkmale müssen auf Basis der im Rahmen der Produktentwicklung gewonnen Erkenntnisse definiert und in Form von Kennzahlen abgebildet werden. Ebenso müssen Eingriffsgrenzen definiert werden. Nach KLEIN (2015) kann die Qualität der Produktion durch die Betrachtung folgender Positionen beschrieben werden:

- Nacharbeitskosten (z. B. durch spanende Bearbeitungen, Austausch von fehlerhaften Komponenten),
- Mehrkosten aufgrund von Produktionsstörungen (z. B. Störungen oder Stillstände von Maschinen, fehlendes Personal oder Material),
- Prüfkosten (z. B. Prüfmittel, Wareneingang-, Fertigungsendprüfung) und
- Fehlerverhütungskosten (z. B. Qualitätssteuerung, Schulungen, Qualitätsaudit).

Diese Kostenaufstellung gibt einen Überblick darüber, welche Auswirkungen sich in Bezug auf die Qualität ergeben können. Mittels der ereignisorientierten Produktionssteuerung ist es hierbei vor allem möglich, Abweichungen von Qualitätsvorgaben zeitnah zu erkennen und dadurch Nacharbeitskosten und Stillstandskosten zu verhindern. Der Einfluss der ereignisorientierten Produktionssteuerung auf die Prüfkosten und Fehlerverhütungskosten ist dagegen eher gering.

Logistische Zielgrößen

Die Auswirkungen der eintretenden Ereignisse beeinflussen die logistischen Zielgrößen. Diese stellen klar definierte Ziele dar, die es im Unternehmen zu erreichen gilt. Die Ziele lassen sich anhand von Kennzahlen, wie beispielsweise Liefertreue, Bestand, DLZ, Kosten, Auslastung oder Ausbringungsleistung, beschreiben. Je

nach Ausrichtung und Schwerpunkt des Unternehmens können diese jedoch beliebig erweitert oder ersetzt werden.

Sensorbasierte Kennzahlen

Sensorik lässt sich anhand unterschiedlicher Merkmale einteilen. So können mittels der Sensorik physikalische, chemische, geometrische, mechanische oder zeitbasierte Messgrößen erfasst werden. Die erfassten Größen können genutzt werden, um beispielsweise Umgebungsbedingungen und Qualitätsmerkmale (Gewicht, Menge, Farbe) zu überprüfen oder um Bauteile zu identifizieren (Anwesenheit/Abwesenheit von Objekten). Für diese Größen können vorab Erwartungswerte sowie Eingriffsgrenzen definiert und zielführende Maßnahmen hinterlegt werden. (KROPP 2016)

Mit Blick auf die Produktionssteuerung wird somit deutlich, dass vorab definierte feststehende Regeln den Auswirkungen entgegenwirken können, jedoch wegen der gegenseitigen Abhängigkeiten der logistischen Zielgrößen für die jeweilige Situation keine optimale Reaktion hinterlegt werden kann. Geeignete Reaktionen müssen zeitnah mithilfe eines Anwendungssystems ermittelt werden.

Schadenswert

Eine quantitative Bewertung der Auswirkungen der Ereignisse dient dazu, die Wichtigkeit der Maßnahmenergreifung abzuleiten. Treten mehrere Ereignisse parallel in der Produktion auf, kann überdies eine klare Priorisierung der Reihenfolge der Ereignisbehandlung abgeleitet werden. Als quantitatives Maß für die Bewertung der Auswirkungen von Ereignissen wird der Schadenswert herangezogen (vgl. Abbildung 35).

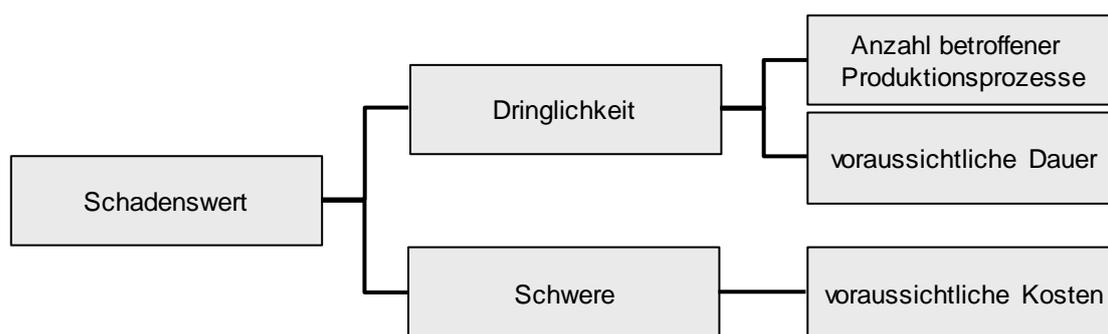


Abbildung 35: Einflussfaktoren Schadenswert

Der Schadenswert setzt sich aus der Dringlichkeit D_e und der Schwere SW_e als Unterpunkte der zu erwartenden Auswirkungen zusammen. Die Dringlichkeit re-

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

sultiert aus der Anzahl der betroffenen Produktionsprozesse n_i^P und der voraussichtlichen Dauer d_e der Auswirkung der Ereignisse. Die Schwere wird durch die hinterlegten Kostensätze k_e für die betroffenen Produktionsprozesse ausgedrückt. Der Zusammenhang ist in Formel (7) dargestellt:

$$S_e = D_e \cdot SW_e = \sum_{i=1}^P n_i^P \cdot d_e \cdot k_e \quad (7)$$

mit	S_e	Schadenswert von Ereignis e
	D_e	Dringlichkeitswert von Ereignis e
	SW_e	Schwere von Ereignis e
	n_i^P	Anzahl der betroffenen Produktionsprozesse P
	d_e	voraussichtliche Dauer der Auswirkungen des Ereignisses e
	k_e	Kosten der betroffenen Produktionsprozesse

Durch die Klassifizierung der Auswirkungen soll eine Möglichkeit geschaffen werden, zielgerichtete Reaktionen auf die Ereignisse zu definieren. Die Auswirkungen haben einen entscheidenden Einfluss auf die Maßnahmenkategorie. Hinsichtlich der Maßnahmenkategorie kann zwischen Regeln unterscheiden werden, die im Aktionsteil eine Reaktion hinterlegt haben, die unabhängig von der aktuellen Situation in der Produktion stets korrekt sind und die eine zielgerichtete Maßnahme enthalten. Regeln, die diesem Muster folgen, werden nachfolgend als fixe Regeln bezeichnet. Die zweite Kategorie von Maßnahmen bezieht sich auf Auswirkungen, denen nicht direkt mit fixen Regeln begegnet werden kann. In diesen Fällen ist die Reaktion z. B. der Aufruf eines Anwendungssystems, sodass die Ereignisbehandlung durch das Anwendungssystem erfolgt.

Damit Ereignisse mit fixen Regeln verarbeitet werden können, müssen bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. So können für physikalische Messwerte vorab Grenzwerte und dementsprechende Reaktionen, wie beispielsweise das Senden einer Warnmeldung, definiert werden. Ebenso können gesetzliche Bestimmungen und die Vorgaben zur Aggregation von simplen Ereignissen zu höherwertigen Ereignissen, z. B. Kennzahlen, in Form von fixen Regeln hinterlegt werden. Des Weiteren kann logischen Zusammenhängen und festgelegten Abläufen mittels fixen Regeln begegnet werden. Voraussetzung dabei ist jedoch, dass in den Produktionsprozessen die Arbeitsanweisungen wie vorgegeben eingehalten werden und bei Änderungen der Abläufe die Regeln angepasst werden. Dies gilt z. B. für die

Erfassung des Materialflusses mittels Auto-ID-Technologien. Bei der Lokalisierung von Produkten können fixe Regeln hinterlegt werden, die den erwarteten Ablauf des Produkts durch die Produktion widerspiegeln. Weichen die tatsächlichen Abläufe aufgrund kurzfristiger Änderungen in der Produktion ab, können zwar Warnmeldungen gesendet werden, ein sinnvoller steuerungsrelevanter Eingriff ist jedoch nicht möglich.

8.3.3 Automatisierungsgrad und Ereignisverarbeitung

Das übergeordnete Ziel der vorliegenden Arbeit ist, Ereignisse zu erkennen und darauf basierend echtzeitnahe Maßnahmen zu initiieren, um somit zu einer Entscheidungsunterstützung beizutragen. Durch die ereignisbasierte Initiierung der Maßnahmen soll die Entscheidungslatenz reduziert werden. In diesem Zusammenhang gilt es, den Grad der Automatisierung der Entscheidungsunterstützung anwendungsfallspezifisch festzulegen. In nachfolgender Abbildung 36 sind mögliche Automatisierungsstufen für das Erzeugen, Auswählen und Umsetzen von Maßnahmen dargestellt (BLUTNER ET AL. 2009).

Grad	Aufgabenverteilung	Überwachung	Alternativen-generierung	Auswahl	Umsetzung	
Automatisierungsgrad	1	Keine Unterstützung durch C, H macht alles	H	H	H	H
	2	C bietet Handlungsalternativen an	HC	H	H	HC
	3	Und schränkt Auswahl ein	HC	H	H	C
	4	Vorschlag einer Alternative	HC	HC	H	HC
	5	Ausführung des Vorschlags nach Bestätigung durch H	HC	HC	H	C
	6	H hat Vetorecht, sonst erfolgt die Ausführung	HC	HC	HC	C
	7	Automatisierte Ausführung und Information von H	HC	C	H	C
	8	Information nur nach Anfrage durch H	HC	HC	C	C
	9	Information nur nach Entscheidung von C	HC	C	C	C
	10	C entscheidet und handelt autonom	C	C	C	C

Legende:

H : Human C : Computer HC : Human & Computer

Abbildung 36: Automatisierungsstufen in Anlehnung an BLUTNER ET AL. (2009)

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Die Art des Auftretens eines Ereignisses sowie dessen Ursachen sind die maßgeblichen Einflussfaktoren für die Definition der Automatisierungsstufe. So können für bekannte und regelmäßig auftretende Ereignisse klare und eindeutig definierte Regeln hinterlegt werden, die eine vollautomatisierte Initiierung von Maßnahmen zur Folge haben. Treten hingegen unbekannte Ereignisse auf, die den Einsatz von Maßnahmen erfordern, muss zunächst die Maßnahmengenerierung durchgeführt werden und für die Initiierung der Maßnahme eine Freigabe durch die Mitarbeiter erfolgen. Um die Latenzzeit trotzdem gering zu halten, müssen die Mitarbeiter durch eine benutzerfreundliche Darstellung der Maßnahmenalternativen sowie durch integrierte Funktionalitäten zur Initiierung der Maßnahmen in die Lage versetzt werden, nach Prüfung der Aktionen die Entscheidungen zeitnah freizugeben.

Zudem können die Ereignisart und die Auswirkung der Ereignisse auch als Grundlage für die Definition von EPA und EPN genutzt werden. Durch den Zusammenschluss mehrerer EPAs über Ereigniskanäle können die EPN für die Ereignisverarbeitung gebildet werden. Dies ermöglicht die Ereignisverarbeitung in Teilschritten, sodass in einzelnen EPA lediglich einfache Ereignisse analysiert werden und wenige Regeln hinterlegt sind (BRUNS & DUNKEL 2010). Hierdurch wird die Skalierbarkeit der Ereignisverarbeitung erhöht. Auf Basis der identifizierten Ereignisse werden somit mehrere EPA zu einem EPN zusammengefasst, wodurch eine mehrstufige und verteilte Verarbeitung der Ereignisse möglich ist.

8.4 Maßnahmengenerierung

8.4.1 Allgemeines

Durch das Ausführen der Regeln in der CEP-Engine werden Reaktionen angestoßen, die in Form von Maßnahmen dargestellt werden. Als Ereignisverarbeitung wird die Art der Reaktion bezeichnet, durch welche Maßnahmen direkt angestoßen werden, sobald ein Muster erkannt wird. Die Ereignisverarbeitung wird in Form von EPNs realisiert. Im Gegensatz dazu findet die Ereignisbehandlung in nachgelagerten operationalen Systemen statt. Die Ereignisverarbeitung und die Ereignisbehandlung sind somit klar voneinander getrennt. Die operativen Anwendungssysteme sind dafür verantwortlich, dass komplexe Algorithmen zur Ableitung passender Maßnahmen ausgeführt werden, Geschäftsprozesse umgesetzt werden oder relevante Ereignisse über grafische Benutzeroberflächen der Anwendungssysteme dargestellt werden. Typische Maßnahmen, die von der CEP-Komponente selbst

angestoßen werden, sind die Generierung neuer Ereignisse, das Auslösen von Alarmen und das Anstoßen von Diensten und Programmen, die dann komplexere Maßnahmen ausführen (vgl. BRUNS & DUNKEL 2010).

Im vorliegenden Teil der Methode werden die Steuerungsmaßnahmen dargestellt, die zur Reaktion auf die identifizierten steuerungsrelevanten Ereignisse eingesetzt werden können. Hierbei wird der Fokus auf kurzfristige Maßnahmen gelegt, die direkten Einfluss auf die Produktionssteuerung haben.

8.4.2 Maßnahmenportfolio

In Abschnitt 8.3 wurde hergeleitet, welche Ereignisse in der Produktion auftreten können, wie diese gegliedert werden und welche Auswirkungen sie auf den Produktionsverlauf ausüben. Zudem wurde dargelegt, wie der zu erwartende Schaden für das Unternehmen mittels geeigneter Kennzahlen quantifiziert werden kann. Nachdem ein Ereignis und seine genauen Auswirkungen erfasst sind, gilt es, Maßnahmen anzustoßen, um eine Verbesserung der aktuellen Produktionssituation herbeizuführen. Grundlegend können die Maßnahmen, die einem Unternehmen hierbei zur Verfügung stehen, wie in Abbildung 37 dargestellt, anhand ihres Zeithorizonts unterschieden werden. Dieser beschreibt verschiedene Spannweiten, durch die die Maßnahmen als strategisch oder operativ bezeichnet werden können (vgl. KURBEL 2005, WIENDAHL 1997).

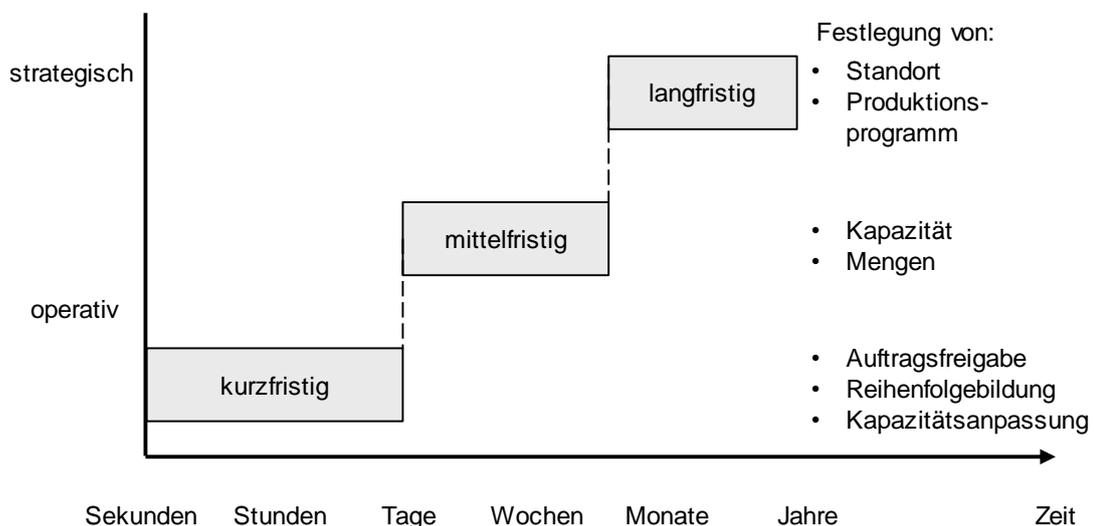


Abbildung 37: Einteilung strategischer und operativer Maßnahmen in Abhängigkeit des Zeithorizonts in Anlehnung an WIENDAHL (1997)

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Die Angabe des Zeithorizonts, kurz-, mittel- und langfristig, bezieht sich hierbei auf die Zeit, die bis zur Umsetzung einer Maßnahme benötigt wird. Das Ziel dieser Arbeit ist es, Maßnahmen auszulösen, durch die möglichst schnell auf vorliegende Ereignisse reagiert und die Produktion gesteuert werden kann. Aus diesem Grund werden ausschließlich operative Maßnahmen in den Maßnahmenkatalog aufgenommen. Anhand der drei Aufgabenbereiche der Produktionssteuerung Auftragsfreigabe, Kapazitätssteuerung und Reihenfolgebildung werden nachfolgend die möglichen Handlungsmaßnahmen für die ereignisbasierte Produktionssteuerung gegliedert.

8.4.3 Operative Maßnahmen zur Anpassung der Auftragsfreigabe

In dem Bereich der Auftragsfreigabe stehen der Produktionssteuerung die in Tabelle 3 dargestellten Maßnahmen zur Verfügung.

Tabelle 3: Maßnahmen zur Auftragsfreigabe

Maßnahme	Voraussetzung
Beschränkung des Zugangs	Keine Eilaufträge betroffen
Änderung des Soll-Endtermins	Ausreichender zeitlicher Puffer
Austausch von Aufträgen zwischen Planungsperioden	Ausreichender zeitlicher Puffer

Beschränkung des Zugangs:

Durch das Einsteuern von weniger Aufträgen ist es möglich, die Auslastung und die Bestände des Systems zu reduzieren (LÖDDING 2016). Diese Maßnahme ist vor allem dann heranzuziehen, wenn es aufgrund von vorangegangenen Ereignissen zu einem Rückstau in der Produktion gekommen ist. Die Freigabe von mehreren Aufträgen hat einen gegenteiligen Effekt und kann dann angewendet werden, wenn die aktuelle Auslastung der zur Verfügung stehenden Kapazitäten oder die generelle Ausbringungsleistung zu gering ist (TRZYNA ET AL. 2015). Allerdings bewirkt diese Maßnahme eine Füllung der Produktion, die einen kontrollierten Durchlauf der Aufträge erschwert, weshalb sie in dieser Arbeit nicht als mögliche Handlungsmaßnahme in den Maßnahmenkatalog aufgenommen wird.

Änderung des Soll-Endtermins:

Durch eine Anpassung des Soll-Endtermins eines Auftrags entsprechend der aktuellen Produktionssituation kann ein Auftrag höher priorisiert werden, sodass dieser auch als Eilauftrag bezeichnete Auftrag bevorzugt behandelt wird. Die Liegezeiten vor Bearbeitungsstationen reduzieren sich folglich, da Eilaufträge stets bevorzugt an den Arbeitsstationen behandelt werden. Eilaufträge haben einen großen Einfluss auf die übrigen Aufträge in der Produktion und sind nur in einem gewissen Maß in der Produktion zu verwenden (TRZYNA ET AL. 2015).

Austausch von Aufträgen zwischen Planungsperioden:

Dem Austausch von Aufträgen liegt ebenfalls die Änderung der Priorisierung von Aufträgen zugrunde. Als ein Kriterium für die Priorisierung von Aufträgen kann neben dem Soll-Endtermin die auftragsspezifische Schlupfzeit herangezogen werden, d. h. der Auftrag mit der kleinsten Schlupfzeit erhält die höchste Priorität. Die Schlupfzeit eines Auftrags bezeichnet die Zeitdauer zwischen dem Plan-Fertigstellungstermin und einem Planungszeitpunkt abzüglich der benötigten Bearbeitungs- und Mindestübergangszeiten (ENGELHARDT 2015). Durch die Ereignisverarbeitung besteht die Möglichkeit, die Schlupfzeit entsprechend der aktuellen Produktionssituation zu verteilen und Aufträge situationsbezogen zu priorisieren.

8.4.4 Operative Maßnahmen zur Anpassung der Reihenfolgebildung

Durch die Festsetzung der Reihenfolge, in der Aufträge abzuarbeiten sind, wird ermöglicht, den Ablauf der Produktion anhand des aktuellen Zustands und der individuellen Ziele positiv zu beeinflussen. Dabei stehen unterschiedliche Maßnahmen, wie das Zusammenfassen von Arbeitsvorgängen, die Rüstooptimierung, das Vorziehen von Arbeitsvorgängen sowie das Rightshifting und Jumping, zur Anpassung der Reihenfolge zur Verfügung (vgl. Tabelle 4).

Tabelle 4: Maßnahmen zur Reihenfolgebildung

Maßnahme	Voraussetzung
Zusammenfassung von Arbeitsvorgängen	Technologische Machbarkeit
Rüstooptimierung	Aufträge des gleichen Typs vorhanden
Vorziehen von Arbeitsvorgängen	Freiwerdende Kapazitäten
Rightshifting und Jumping	Puffer für zurückgestellte Aufträge

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Zusammenfassung von Arbeitsvorgängen:

Das Zusammenfassen von Arbeitsvorgängen umfasst das Parallelisieren von Arbeitsvorgängen. Dies kann zur Folge haben, dass temporär ein höherer Personalbedarf besteht, jedoch Stillstandszeiten der Anlagen reduziert werden. Voraussetzung für den Einsatz dieser Maßnahme ist, dass die Zusammenfassung der Arbeitsvorgänge technologisch machbar ist.

Rüsto Optimierung:

Durch die Verringerung der Rüstzeitanteile kann eine Erhöhung der produktiven Zeit einer Anlage erzielt werden. Dies ist besonders relevant für Engpasssituationen, da durch die rüsto optimierte Anpassung der Reihenfolge die maschinelle Kapazität erhöht wird. Voraussetzung hierfür ist, dass passende Aufträge vorliegen, die mit den eingebauten Werkzeugen bearbeitet werden können.

Vorziehen von Arbeitsvorgängen:

Das Vorziehen von Arbeitsvorgängen kann ebenfalls zu einer Erhöhung der maschinellen Kapazität führen, wenn dadurch freiwerdende Kapazitäten genutzt werden. Das Vorziehen von Arbeitsvorgängen kann beispielsweise Auswirkungen auf Wartungsvorgänge haben. Somit können im Gegenzug erhöhte Kosten für vorzeitig ausgetauschte Ressourcen anfallen. Hierbei gilt es, zwischen den erforderlichen Stillstandszeiten und den Kosten für nicht genutztes Material abzuwägen. Das Verschieben von Wartungsvorgängen auf spätere Zeitpunkte wird im Rahmen dieser Arbeit nicht weiterverfolgt, da durch die Überschreitung der Nutzungsdauer von Werkzeugen und Anlagen eine höhere Störungswahrscheinlichkeit besteht und durch die Störungen Schäden entstehen können, die in keinem Verhältnis zum erzielten Nutzen stehen.

Rightshifting und Jumping:

Die Methode Rightshifting wird verwendet, um Auswirkungen infolge eines Ereignisses für die nachfolgenden Aufträge möglichst gering zu halten. Hierfür werden die von einer Störung betroffenen Aufträge im Verlauf des Ablaufplans immer weiter nach „rechts“, d. h. in die Zukunft, verschoben (BRACKEL 2009). Die Besonderheit beim Rightshifting und Jumping stellt dabei dar, dass nicht alle nachfolgenden Aufträge verschoben werden, sondern lediglich der betroffene Auftrag selbst (BRÜGGEMANN 2010). Somit werden die Folgeaufträge übersprungen und sichergestellt, dass die von dem Ereignis nicht betroffenen Aufträge ohne weitere

Beeinflussung fertiggestellt werden. Der Zeitpunkt zur Bearbeitung der zurückgestellten Aufträge wird hierbei in die nächste freie Auslastungslücke verschoben und dort bearbeitet, wenn nicht weitere Verschiebungen erforderlich sind.

8.4.5 Operative Maßnahmen zur Anpassung der Kapazität

Die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung unterscheiden sich stark in Bezug auf den jeweiligen Planungshorizont, der benötigt wird, um die Maßnahmen zu planen und umzusetzen. Für den Maßnahmenkatalog sind all jene Maßnahmen bedeutsam, die in einem kurzen Planungshorizont umgesetzt werden können, weshalb diese im Folgenden genauer beschrieben werden. Tabelle 5 gibt einen Überblick über die Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung.

Tabelle 5: Maßnahme zur Kapazitätsanpassung

Maßnahme	Voraussetzung
Anpassung der Bearbeitungsgeschwindigkeit	Sicherer fehlerfreier Prozess
Einsatz von Springern	Springer vorhanden
Mehrmaschinenbedienung	Mitarbeiter mit freier Kapazität
Substitution von Maschinen	Freiwerdende Kapazitäten
Überlappende Fertigung	Transportkapazität

Anpassung der Bearbeitungsgeschwindigkeit:

Abhängig von dem vorliegenden Fertigungssystem ist es möglich, Bearbeitungsgeschwindigkeiten zu verändern (LÖDDING 2016). Diese Maßnahme kann sowohl bei Anlagen als auch bei manuellen Arbeitsplätzen angewandt werden. Die Bearbeitungsgeschwindigkeit von Anlagen ist durch die Maschinenparameter vorgegeben. Diese legen fest, in welcher Geschwindigkeit z. B. Bearbeitungen ausgeführt, Werkzeuge gewechselt oder Förderbänder bewegt werden können. Um einerseits den Verschleiß von Maschinen zu reduzieren und um andererseits die Gefahr von Störungen zu minimieren, werden die Anlagen im normalen Produktionsverlauf nicht mit maximaler Geschwindigkeit betrieben. Sinkt allerdings beispielsweise die DLZ oder die Ausbringungsleistung infolge eines Ereignisses stark ab, stellt die Erhöhung der Geschwindigkeit eine mögliche Gegenmaßnahme dar. Ähnlich

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

verhält es sich mit manuellen Arbeitsplätzen. In der normal geforderten Geschwindigkeit soll es den Mitarbeitern möglich sein, ihre Aufgaben gewissenhaft und fehlerfrei zu erledigen. Eine Erhöhung der Taktzeit kann hierbei zu Unachtsamkeit und Belastungen des Personals führen, weswegen diese Maßnahme nur in einem vorgegebenen Rahmen einzusetzen ist.

Einsatz von Springern:

Als Springer wird ein Mitarbeiter bezeichnet, der nicht als feste Kapazität an einem bestimmten Arbeitsplatz eingeplant ist. Daraus ergibt sich die Möglichkeit, ihn je nach Bedarf flexibel an verschiedenen Arbeitssystemen, die aktuell mehr Kapazität benötigen, in der Produktion einzusetzen. Um als Springer eingesetzt werden zu können, ist eine Mehrfachqualifikation der Mitarbeiter erforderlich. Generell kann diese nach LÖDDING (2016) dazu beitragen, fehlende Produktionskapazitäten schnell bereitzustellen, Ausfälle von Mitarbeitern zu kompensieren und zusätzlich für ein ganzheitliches Systemverständnis zu sorgen. Die Zuordnung der Mitarbeiter wird hierbei über die Personaldisposition geregelt.

Mehrmaschinenbedienung:

Eine Mehrmaschinenbedienung kann nach DICKMANN (2015) von Mitarbeitern ausgeführt werden, die an ihrem aktuellen Arbeitsplatz nicht vollständig ausgelastet sind und damit freie Kapazitäten zur Verfügung haben. Hierfür wechselt der Arbeiter in einem bestimmten Rhythmus zwischen den Arbeitsplätzen, wodurch die Arbeitszeit aufgrund von geringerer Wartezeit effizienter ausgenutzt wird (DICKMANN 2015). Im Gegensatz zu dem Springer behält der Mitarbeiter bei der Mehrmaschinenbedienung den ursprünglichen Arbeitsplatz bei und wechselt lediglich zwischen diesem und einer neuen zusätzlichen Tätigkeit. Voraussetzung, um bei der Mehrmaschinenbedienung mehrere verschiedene Arbeitsaufgaben ausüben zu können, ist, analog zum Springer, eine entsprechende Mehrfachqualifikation (LÖDDING 2016).

Substitution von Maschinen:

Eine Maschine zu substituieren bedeutet, dass sie durch eine andere Maschine ersetzt wird. Für die ereignisbasierte und echtzeitnahe Produktionssteuerung bezieht sich dies jedoch nicht auf das Ersetzen einer Maschine im physischen Sinne, sondern im Sinne der systemtechnischen Zuordnung eines Auftrags zu einer anderen Maschine. Die Substitution einer Maschine wird notwendig, wenn sich deren Kapazität durch einen Vorfall an der Maschine vermindert hat oder wenn durch die

Menge an eingesteuerten Aufträgen die ursprüngliche Kapazität nicht mehr ausreicht. Voraussetzung für diese Maßnahme ist mindestens eine weitere Maschine, die im Stande ist, die geforderten Fertigungsaufgaben in gleicher Güte zu erledigen und ihre maximale Auslastung durch eigene Aufträge noch nicht erreicht hat (vgl. LÖDDING 2016). Die Entscheidung, ob sich eine Maschine für die nötige Substitution eignet, kann in Bezug auf die Ressourcen oder die Aufträge erfolgen. Ressourcenbezogen bedeutet hierbei, dass die Maschine selbst ersetzbar ist. Bei der auftragsbezogenen Betrachtung wird darauf geachtet, dass die für die Fertigung eines Auftrages nötigen Vorgänge an der ausgewählten Maschine ausführbar sind. Werden Maschinen substituiert, so entstehen für das Unternehmen, abhängig von den gegebenen Rahmenbedingungen, zusätzliche Kosten. Zum einen sind hier Kosten durch den generellen Betrieb von mehreren Maschinen zu nennen, wodurch Kosten abhängig vom zugrunde gelegten Stundensatz und Verschleiß entstehen. Zum anderen fallen weitere Kosten für erforderliche Rüstvorgänge oder zusätzlich benötigte Transporte an.

Überlappende Fertigung:

Die überlappende Fertigung wird eingesetzt, um sowohl einzelne Aufträge zu beschleunigen als auch Bestände und Durchlaufzeiten zu reduzieren (vgl. LÖDDING 2016). Dieses Ziel wird erreicht durch die Nutzung von freien Kapazitäten. Hierfür werden bei der überlappenden Fertigung Lose aufgespalten, die anschließend frühzeitig dem nachfolgenden Bearbeitungsschritt zugeführt werden können. Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, einzelne Aufträge nach dem One-Piece-Flow-Prinzip zu behandeln oder diese in Lose zusammenzufassen. Die Methode der überlappenden Fertigung stellt einen Mittelweg zwischen den beiden Methoden dar. Aufgabe bei der überlappenden Fertigung ist es, durch geschicktes Aufspalten der Lose die Liegezeiten der bereits bearbeitenden Aufträge sowie die Stillstandszeit der nachfolgenden Maschine zu reduzieren. Das Aufspalten der Lose hat zur Folge, dass mehrere kleine Lose als ursprünglich veranschlagt zu transportieren sind, wodurch dem Unternehmen Transportkosten in Höhe der zusätzlich benötigten Transportvorgänge entstehen.

8.5 Maßnahmenpriorisierung und -auswahl

Durch die Klassifizierung der Steuerungsstrategien im vorherstehenden Abschnitt wird ermöglicht, für Ereignisse situationsspezifisch Steuerungsstrategien auszuwählen, welche einen positiven Einfluss auf die Zielerreichung haben. Ziel des

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

vorliegenden Abschnittes ist es, basierend auf einer Vorauswahl mögliche Entscheidungen für spezifische Maßnahmen abzuleiten (KLEIN 2015). Als Reaktion auf Ereignisse können Maßnahmen miteinander verknüpft werden, wobei die Wechselwirkungen dieser Entscheidungen untereinander ebenfalls beachtet werden müssen. Mittels einer Ursache-Wirkungs-Matrix werden die Zusammenhänge zwischen Maßnahmen und den Zielgrößen beschrieben. Durch die Auswahl der Steuerungsmaßnahmen findet als finaler Schritt der vorliegenden Methode eine Rückkopplung zu den Fertigungsressourcen statt.

8.5.1 Zielgrößen und Kennzahlensystem

Auf Basis der definierten Kennzahlen sollen passende Maßnahmen ausgewählt werden. Ziel der Kennzahlen ist es, die erbrachte logistische Leistung des betrachteten Systems zu messen und Ansatzpunkte für das Eingreifen mit situationsbezogenen Maßnahmen aufzuzeigen. Abbildung 38 zeigt die Gestaltung des Kennzahlensystems, das auf Basis der logistischen Zielgrößen aufgebaut ist und sich auf die Kategorien Aufträge und Betriebsmittel bezieht.

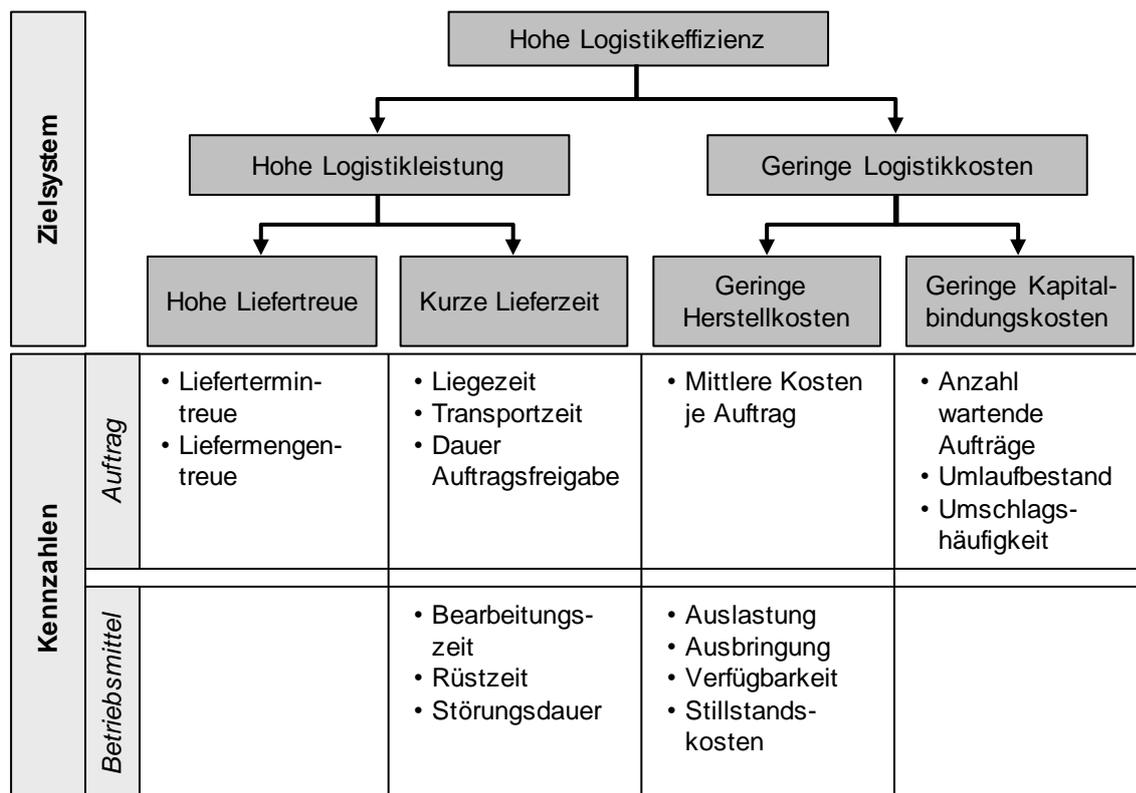


Abbildung 38: Beispielhafte Gestaltung des Kennzahlensystems

Das Kennzahlensystem leitet sich aus dem Zielsystem ab und umfasst beispielhaft konkrete Kennzahlen, die im produktionstechnischen Umfeld relevant sind. Wie

in Abschnitt 2.1.2 erläutert, bestehen Wechselwirkungen und gegenseitige Abhängigkeiten zwischen den Zielgrößen und somit auch den Kennzahlen. Diese gilt es, bei der Maßnahmenpriorisierung und -auswahl zu berücksichtigen.

8.5.2 Unternehmensspezifische Gewichtung der Kennzahlen

Die grundlegende Gewichtung der Kennzahlen gibt dem Unternehmen die Möglichkeit, die damit verbundenen Ziele entsprechend ihrer Wichtigkeit zu ordnen. Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 erläutert, besteht zwischen den logistischen Zielgrößen ein Zielkonflikt, wodurch es nicht möglich ist, alle Ziele in gleichem Maße zu erfüllen. Demzufolge ist es erforderlich, anwendungsfallspezifisch festzulegen, welche Ziele aktuell für das Unternehmen relevant sind. Generell ist jedoch festzustellen, dass sich die Bedeutung der Ziele weg von den kostenbezogenen und hin zu den leistungsbezogenen Größen entwickelt hat. Demzufolge rücken Kennzahlen wie die Termintreue und die DLZ in den Vordergrund, wogegen die Auslastung an Bedeutung verliert (KURBEL 2005).

Die Priorisierung und Gewichtung der einzelnen Kennzahlen und Ziele zueinander erfolgt mittels eines paarweisen Vergleichs nach dem Prinzip des Analytic Hierarchy Process (AHP) von SAATY (1994). Durch einen paarweisen Vergleich können jeweils zwei Größen direkt gegenübergestellt werden. Die Bewertungsskala, die dem AHP zugrunde liegt und anhand derer die Wichtigkeit der Elemente bewertet wird, umfasst nach SAATY (2000) die Zahlenwerte eins bis neun. Der Wert eins beschreibt hierbei eine gleiche Wichtigkeit, während der Wert neun für ein extrem viel wichtigeres Ereignis steht. Die genaue Abstufung der Skala ist in Tabelle 6 aufgezeigt.

Tabelle 6: Bewertungsskala für die Gewichtung der Elemente nach SAATY (2000)

Bedeutung	Werte
Gleich wichtig	1
Mäßig wichtiger	3
Wesentlich wichtiger	5
Sehr viel wichtiger	7
Extrem viel wichtiger	9
Zwischenwerte	2,4,6,8
Reziprokwerte	$\frac{1}{2}, \frac{1}{3}, \frac{1}{4}, \frac{1}{5}, \frac{1}{6}, \frac{1}{7}, \frac{1}{8}, \frac{1}{9}$

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche werden als Matrix dargestellt. Anschließend erfolgt die Normierung der Matrix durch Bildung der Spaltensummen und die Division der einzelnen Werte durch die jeweilige Spaltensumme. Die Gewichtung der Kriterien ergibt sich durch die Bildung der Zeilensummen, die durch die Anzahl an Kriterien dividiert wird. (PETERS & ZELEWSKI 2002)

Abschließend kann mittels Berechnung des von SAATY (2000) entwickelten Konsistenzindex (C. I. = Consistency Index) und des Konsistenzwertes (C. R. = Consistency Ratio) eine Konsistenzprüfung der berechneten Gewichtung vorgenommen werden. Zur Bestimmung des Konsistenzindex muss der maximale Eigenwert der Matrix ermittelt werden. Laut SAATY (2000) muss der paarweise Vergleich für Werte von $C. R. \geq 0,1$ überarbeitet werden.

In Abbildung 39 ist eine mögliche Zielgrößenbewertung für ein Unternehmen aufgezeigt. In diesem Beispiel wird die Termintreue als wichtigste Größe bewertet, gefolgt von der Ausbringung und der DLZ. Schließlich folgt der Bestand, der wichtiger als die Auslastung eingestuft wird. Für eine bessere Übersicht werden nur die Werte oberhalb der Diagonale befüllt. Unterhalb der Diagonalen ergeben sich die reziproken Werte.

als	DLZ	Auslastung	Termintreue	Bestand	Ausbringung	Gewichtung	
wichtiger							
DLZ	1	7	0,33	1	1	18,3 %	
Auslastung		1	0,14	0,33	0,33	4,6 %	
Termintreue			1	5	3	46,9 %	
Bestand				1	0,33	11,2 %	
Ausbringung					1	19,2 %	C. R. = 0,057

Abbildung 39: Beispielhafte Gewichtung der Ziele zur Priorisierung der Kennzahlen

8.5.3 Vorselektion der Maßnahmen mittels Ursache-Wirkungs-Matrix

Um die Steuerungsmaßnahmen zielgerichtet einzusetzen, muss bekannt sein, welche Einflüsse die Strategien auf die einzelnen Ziele haben. Hierfür wird im Rahmen der vorliegenden Methode ein Wirkmodell dargestellt, das die Auswirkungen

8.5 Maßnahmenpriorisierung und -auswahl

der einzelnen Maßnahmen auf die Kennzahlen beschreibt und die Strategien bezüglich ihrer Zielbeeinflussung klassifiziert. Die Ursache-Wirkungs-Matrix dient der qualitativen Verknüpfung der Maßnahmen und Kennzahlen. In Abbildung 40 ist ein beispielhafter Aufbau einer Ursache-Wirkungs-Matrix skizziert.

Kennzahl \ Maßnahme		Termin-treue	Mengen-treue	Liegezeit	Transportzeit	Dauer Auftragsfreigabe	Bearbeitungszeit	Rüstzeit	Störungsdauer	Produktionskosten	Auslastung	Ausbringung	Verfügbarkeit	Stillstandskosten	Anzahl wartende Aufträge	Umlaufbestand	Umschlagshäufigkeit
		Termin-treue	Mengen-treue	Liegezeit	Transportzeit	Dauer Auftragsfreigabe	Bearbeitungszeit	Rüstzeit	Störungsdauer	Produktionskosten	Auslastung	Ausbringung	Verfügbarkeit	Stillstandskosten	Anzahl wartende Aufträge	Umlaufbestand	Umschlagshäufigkeit
Auftragsfreigabe	Beschränkung des Zugangs																
	Änderung des Soll-Endtermins																
	Austausch von Aufträgen																
Kapazitätsanpassung	Anpassung Bearb. Geschwindigkeit																
	Springer																
	Mehrmaschinen Bedienung																
	Substitution																
	Überlappende Fertigung																
Reihenfolgebildung	Zusammenfassung von AV																
	Rüsto-optimierung																
	Vorziehen von Arbeitsvorgängen																
	Rightshifting und Jumping																

Legende:

- : keine Wirkung
- : Wirkung

Abbildung 40: Zusammenhang zwischen Maßnahmen und Kennzahlen dargestellt in einer Ursache-Wirkungs-Matrix

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Das Ziel ist es, die Auswahl der geeigneten Steuerungsmaßnahmen zu unterstützen. Durch den Einsatz eines logistischen Wirkmodells können Maßnahmen vorausgewählt und die Anzahl näher zu analysierender Maßnahmen reduziert werden. Eine Reduzierung der möglichen Maßnahmen ist sinnvoll, um den Aufwand und die Rechenzeit zur Überprüfung der Auswirkungen von Maßnahmen zu reduzieren.

8.5.4 Definition der Zielfunktion

Die monetären Folgen eines Ereignisses werden als Zielfunktion formuliert, um passende Maßnahmen auszuwählen. Die Zielfunktion soll die monetären Auswirkungen, die sich durch die Ereignisse ergeben, sowie die Kosten, die durch die Ergreifung einer Maßnahme entstehen, umfassen. Es gilt, die Zielfunktion zu minimieren und dementsprechend zielführende Maßnahmen umzusetzen.

Im Zusammenhang mit der in der vorliegenden Arbeit adressierten ereignisorientierten Produktionssteuerung sind dabei die Mehrkosten K_j^{Mehr} relevant, die für einen Produktionsprozess im Rahmen der betrachteten Periode p_j für die Abwicklung der aktuellen Aufträge durch das Auftreten von Ereignissen und das Ergreifen von Maßnahmen anfallen.

Der Berechnung der Mehrkosten K_j^{Mehr} liegt folgende Formel (8) zugrunde.

$$K_j^{Mehr} = \sum_{i=1}^n K_{ij} = \sum_{i=1}^n K_{ij}^{Ereignis} + \sum_{i=1}^n K_{ij}^{Maßnahme} \quad (8)$$

mit	K_j^{Mehr}	Mehrkosten in der betrachteten Periode p_j
	K_{ij}	Mehrkosten durch Ereignis e_i in Periode p_j
	$K_{ij}^{Ereignis}$	Kosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j
	$K_{ij}^{Maßnahme}$	Kosten der Maßnahme von Ereignis e_i in Periode p_j

Die Kosten $K_{ij}^{Ereignis}$, die sich durch das Eintreten von Ereignissen ergeben, setzen sich, wie in Formel (9) dargestellt, für die betrachtete Periode p_j aus vier Kostenpositionen zusammen. Zu diesen zählen die zusätzlich verursachten Produktionskosten K_{ij}^{Prod} und die Logistikkosten K_{ij}^{Log} sowie die monetäre Betrachtung bei

Verletzung der Termintreue. Die verspätete Lieferung von Aufträgen führt zu Verzugskosten K_{ij}^{Verz} (z. B. Konventionalstrafen) und Opportunitätskosten K_{ij}^{Opp} in Form von entgangenen Deckungsbeiträgen.

$$K_{ij}^{Ereignis} = K_{ij}^{Prod} + K_{ij}^{Log} + K_{ij}^{Verz} + K_{ij}^{Opp} \quad (9)$$

mit	$K_{ij}^{Ereignis}$	Kosten der Auswirkung des Ereignisses e_i in der Periode p_j
	K_{ij}^{Prod}	Produktionskosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j
	K_{ij}^{Log}	Logistikkosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j
	K_{ij}^{Verz}	Verzugskosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j
	K_{ij}^{Opp}	Opportunitätskosten der Auswirkung von Ereignis e_i in Periode p_j

Die durch die Maßnahmen verursachten Kosten werden mittels der Kostenposition $K_{ij}^{Maßnahme}$ abgebildet. Anhand dieser Komponente werden die Kosten, die durch Einleitung einer Maßnahme entstehen, beschrieben. Diese können gemäß Formel (10) aus einem fixen $K_{ij}^{FixMaßnahme}$ und einem variablen $K_{ij}^{VarMaßnahme}$ Kostenanteil bestehen. Variable Kosten können dabei z. B. durch erhöhten Materialverbrauch entstehen, wohingegen strukturelle Maßnahmen (z. B. der Einsatz eines Springers) zu fixen Kosten führen.

$$K_{ij}^{Maßnahme} = K_{ij}^{FixMaßnahme} + K_{ij}^{VarMaßnahme} \quad (10)$$

mit	$K_{ij}^{Maßnahme}$	Kosten der Maßnahme für Ereignis e_i in der Periode p_j
	$K_{ij}^{FixMaßnahme}$	fixer Anteil der Kosten für die Maßnahme in der betrachteten Periode p_j
	$K_{ij}^{VarMaßnahme}$	variabler Anteil der Kosten für die Maßnahme in der betrachteten Periode p_j

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Zur Modellierung und Lösung eines Problems mittels mathematischer Optimierung gilt es, drei Hauptobjekte zu identifizieren, die Variablen, die Nebenbedingungen und die Zielfunktion. Ziel im Rahmen der Produktionssteuerung ist, die entstehenden Kosten (vgl. Formel 8) insgesamt zu minimieren. Es entstehen nur Kosten, wenn das entsprechende Ereignis eintritt und die Maßnahme vorgenommen wird. Das Eintreten dieser Zustände kann mithilfe von ganzzahligen Variablen $x_1, \dots, x_j \in \mathbb{N}_0$ sowie kontinuierlichen Variablen $x_{j+1}, \dots, x_n \in \mathbb{R}_0$ modelliert werden.

Folglich stellt sich die Zielfunktion des Problems gemäß Formel (11) und (12) dar mit den genannten Variablen und Nebenbedingungen:

$$\text{Min } K^{\text{Mehr}} = \sum_{j \in T} k_j^{\text{Mehr}}(x_i, y_i) \quad (11)$$

$$\begin{aligned} k_j^{\text{Mehr}}(x_i, y_i) &= \sum_{i \in E} k_i^{\text{Prod}}(t) + \sum_{i \in E} k_i^{\text{Log}}(t) \\ &+ \sum_{i \in E} k_i^{\text{Verz}}(t) + \sum_{i \in E} k_i^{\text{Opp}}(t) \\ &+ \sum_{i \in E} (k_i^{\text{Fix}}(t) * x_i) + \sum_{i \in E} (k_i^{\text{Var}}(t) * y_i) \end{aligned} \quad (12)$$

mit

Mengen

$j \in T = \{1, \dots, T^{\text{max}}\}$ Menge der Zeitpunkte für Ergreifung von Maßnahmen

$i \in E = \{1, \dots, E^{\text{max}}\}$ Menge der Zeitpunkte für Auftritt von Ereignissen

Entscheidungsvariablen

x_i Entscheidungsvariable fixe Maßnahmenkosten

y_i Entscheidungsvariable variable Maßnahmenkosten

Zeitabhängige Funktionen

$k_j^{\text{Mehr}}(x_i, y_i)$ Mehrkosten in Periode p_j

$k_i^{\text{Prod}}(t)$ Produktionskosten bei Auftritt von Ereignis e_i

$k_i^{\text{Log}}(t)$ Logistikkosten bei Auftritt von Ereignis e_i

$k_i^{Verzug}(t)$	Verzugskosten bei Auftritt von Ereignis e_i
$k_i^{Opp}(t)$	Opportunitätskosten bei Auftritt von Ereignis e_i
$k_i^{Fix}(t)$	fixer Anteil der Kosten bei Ergreifung einer Maßnahme
$k_i^{Var}(t)$	variabler Anteil der Kosten bei Ergreifung einer Maßnahme

Nebenbedingungen

$x_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in T$ Binärvariable

$y_i \in \{0,1\} \quad \forall i \in T$ Binärvariable

Die Nebenbedingungen bedeuten für den Wert 0, dass die jeweiligen fixen bzw. variablen Kostenanteile nicht anfallen, für den Wert 1 hingegen, dass die Kosten entsprechend auftreten.

8.5.5 Online-Optimierung mit Look-ahead

Die Minimierung der Zielfunktion stellt ein Optimierungsproblem dar, wobei die relevanten Zustände und Daten einzubeziehen und zugleich kurze Antwortzeiten einzuhalten sind (SCHÖNING & DORCHAIN 2014). Wenn Ereignisse erkannt werden, die Abweichungen von den ursprünglich geplanten Produktionsabläufen indizieren, sind die Produktionspläne nicht mehr aktuell und müssen angepasst werden. Somit müssen die neuen Produktionspläne auf Basis der aktuellen Situation neu berechnet werden. Diese Problemstellung wird auch als sog. *Complex Online Optimization* bezeichnet.

Zur Lösung dieser Problemstellung wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine Verknüpfung der Online-Optimierung und der Ereignisverarbeitung mittels CEP-Technologie herangezogen. Nachfolgend werden die erforderlichen einzelnen Komponenten sowie deren Zusammenwirken näher erläutert.

Online-Optimierungen lassen einen kontinuierlichen Zustrom von Daten zu, bei klassischen Optimierungen müssen hingegen vor dem Start des Lösungsverfahrens alle Daten vorliegen. Es ist somit ein Lösungsverfahren auszuwählen, welches das Optimierungsproblem in Echtzeit lösen kann. Das Modell muss in der Lage sein,

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

die sich ändernden Daten zu verarbeiten und basierend auf den zum aktuellen Zeitpunkt verfügbaren Daten eine Entscheidung zu treffen (VDI 3633).

Online-Entscheidungen lassen sich wie nachfolgend in Abbildung 41 dargestellt klassifizieren. Die verschiedenen Arten von Online-Entscheidungen werden hinsichtlich der Anzahl der in der Zielfunktion zu berücksichtigenden Kriterien sowie der Ursachen, die eine Entscheidung erforderlich machen, charakterisiert. Ein weiteres Merkmal bezieht sich darauf, ob für die Durchführung der Entscheidung vorbereitende Maßnahmen getroffen werden müssen. Online-Optimierungen, die Kenntnisse über die Zukunft berücksichtigen, werden als Online-Optimierung mit Look-ahead bezeichnet (DUNKE ET AL. 2014).

Online Entscheidungen		Klassifikationsmerkmale
multikriteriell	einkriteriell	Anzahl der Kriterien
selbstinitiiert	erzwungen	Ursache/Initiierung
mit vorbereitenden Maßnahmen an Zielorten	ohne vorbereitenden Maßnahmen an Zielorten	Durchführung von vorbereitenden Maßnahmen
mit Vorschau	ohne Vorschau	Kenntnis der Zukunft

Abbildung 41: Arten von Online-Entscheidungen in Anlehnung an VDI (3633)

Eine Online-Optimierung mit Look-ahead wird den Online-Optimierungen zugeordnet. Jedoch ist die Online-Optimierung mit Look-ahead zwischen der reinen Online-Optimierung und der reinen Offline-Optimierung einzuordnen. Online-Optimierungen mit Look-ahead zeichnen sich dadurch aus, dass die Optimierung für ein gewisses Zeitfenster auf in der Zukunft liegende Informationen zugreifen kann (DUNKE & NICKEL 2016). Dies gilt insbesondere für Abläufe, die die Produktionssteuerung betreffen. So sind beispielsweise die erforderlichen Arbeitsvorgänge und die zu bearbeitenden Aufträge für ein gewisses Zeitfenster bekannt und auf dieser Grundlage muss eine optimale Reihenfolge für die Bearbeitung ermittelt werden.

Damit das Optimierungsproblem gelöst werden kann, ist der passende Algorithmus für das vorliegende Optimierungsproblem auszuwählen. Ebenso muss der Einfluss des gewählten Look-aheads auf die Leistung des gewählten Algorithmus berücksichtigt werden (DUNKE & NICKEL 2013). Für die Dimensionierung des Look-aheads gilt, je größer dieser gewählt wird, desto größer ist das Intervall eines möglichen Prognosefehlers. (DUNKE ET AL. 2014)

Lösungsverfahren

Bei der oben genannten Zielfunktion (11) handelt es sich um eine gemischt-ganzzahlige lineare Optimierung (engl.: Mixed integer linear programming (MILP)). MILP sind Optimierungsaufgaben mit großer Praxisrelevanz (KALLRATH 2013). Zudem ist es in manchen Fällen möglich, nichtlineare Probleme mit Binärvariablen umzuformulieren und diese dann approximativ in Form eines MILP-Problems zu lösen. Zur Lösung dieser Problemstellungen können exakte oder heuristische Lösungsverfahren gewählt werden. Durch mathematisch exakte Verfahren wird die optimale Lösung eines Problems ermittelt (ROTHLAUF 2011).

Das Lösen komplexer Probleme mit einer Vielzahl an Randbedingungen und Ressourcen führt bei Verwendung exakter Lösungsverfahren jedoch zu langen Rechenzeiten. Aus diesem Grund bietet sich für diese Fälle der Einsatz von Heuristiken an (ROTHLAUF 2011). Heuristiken zeichnen sich dadurch aus, dass in einer überschaubaren Rechenzeit gute Lösungen gefunden werden. Dabei besteht jedoch keine Garantie, dass es sich bei der gefundenen Lösung um die optimale Lösung handelt. Zu den Heuristiken zählen Verfahren wie Simulated Annealing, Tabu-Suche, Ameisenalgorithmen oder evolutionäre Algorithmen, deren Verfahrensregeln sich oftmals an Vorgängen aus der Natur anlehnen (GASS & FU 2016).

Für MILP-Problemstellungen haben sich Lösungsverfahren nach dem Branch-and-Bound-Prinzip etabliert (GASS & FU 2016). Zur Lösung des mathematischen Problems wird dieses iterativ in Teilprobleme aufgeteilt und somit ein Entscheidungsbaum (Branch) aufgebaut. Die Teilprobleme werden durch das Ersetzen von Binärvariablen mit reellen Variablen relaxiert und es werden deren obere und untere Schranken (Bound) berechnet. Auf Basis der Schranken wird bewertet, ob sich das gesuchte Optimum innerhalb des Teilproblems befindet (ROTHLAUF 2011).

Zur Steigerung der Effizienz wird das Branch-and-Bound-Prinzip mit Schnittebenenverfahren (Branch-and-Cut) kombiniert, wodurch einzelne Äste frühzeitig abgetrennt werden können. Zudem sind in aktuellen Solvern Heuristiken integriert,

8 Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

die eine effizientere Bestimmung der Schranken zulassen (HARJUNKOSKI ET AL. 2014).

Das Branch-and-Bound-Verfahren ist ein etablierter Ansatz zur Lösung von MILP-Problemen. Es stehen zahlreiche Solver für eine effiziente Implementierung und Berechnung der Optimierungslösung mittels des Verfahrens zu Verfügung (HARJUNKOSKI ET AL. 2014). Aus diesem Grund wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Umsetzung der Optimierung mittels eines Branch-and-Bound-Ansatzes vorgenommen (vgl. Abschnitt 9.4.1).

8.6 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde die Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung dargestellt, welche aus der Initiierung, der Generierung sowie der Auswahl und Priorisierung von Maßnahmen zur Entscheidungsunterstützung besteht. Der Ablauf der Methode wurde in Abschnitt 8.2 aufgezeigt.

Die Ereignisse wurden hinsichtlich ihres Auftretens und ihrer Auswirkungen klassifiziert, um die Gestaltung der Maßnahmeninitiierung festzulegen. Auf dieser Basis kann der Automatisierungsgrad und die Gestaltung der Ereignisverarbeitung in Form der EPAs und EPNs festgelegt werden. Die Auswirkungen der Ereignisse können zudem durch den zu erwartenden Schadenswert bewertet und somit die zu ergreifenden Maßnahmen priorisiert werden.

Im Rahmen der Maßnahmengenerierung kann zwischen der Ereignisverarbeitung und der Ereignisbehandlung unterschieden werden. Im Hinblick auf die Produktionssteuerung wurde hierbei insbesondere die Definition von Maßnahmen für die Ereignisbehandlung fokussiert. Das Maßnahmenportfolio umfasst Maßnahmen, die sich auf einen kurzfristigen Planungshorizont beziehen, und gliedert sich in die Bereiche Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung.

Für die Maßnahmenpriorisierung ist es erforderlich, dass ein Kennzahlensystem definiert wird und dieses unternehmensspezifisch gewichtet wird. Aufbauend auf einer Ursache-Wirkungs-Matrix kann eine Vorselektion für die Maßnahmenauswahl erfolgen. Eine zentrale Zielgröße stellen die Kosten dar, die durch die Auswirkungen der Ereignisse entstehen. Diese müssen mit den Kosten, die durch die Maßnahmenergreifung anfallen, in Zusammenhang gestellt werden. Durch die

passende Auswahl von Maßnahmen gilt es, die entstehenden Kosten entsprechend zu reduzieren.

Für die Lösung dieser Zielfunktion kommt eine Online-Optimierung mit Look-ahead zum Einsatz. Auf Basis der Ergebnisse der Optimierung können Entscheidungen für die Maßnahmenauswahl abgeleitet werden und somit eine echtzeitnahe und ereignisbasierte Entscheidungsunterstützung realisiert werden.

Im nachfolgenden Kapitel 9 erfolgt die Anwendung, Validierung sowie Bewertung des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung anhand eines realen Anwendungsbeispiels.

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

9.1 Allgemeines

Ziel des vorliegenden Kapitels ist es, die Funktionsweise des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung zu demonstrieren. Hierzu wird in Abschnitt 9.2 das Anwendungsbeispiel detailliert beschrieben. Anhand eines industriellen Beispiels wird die Anwendung des Systems erläutert. Im Speziellen werden die Ereignismodellierung in Abschnitt 9.3.2 sowie die Definition von Eingriffsgrenzen und die Mustererkennung in Abschnitt 9.3.3 aufgezeigt. Des Weiteren erfolgt in Abschnitt 9.3.4 die simulationsbasierte Umsetzung und Validierung der in Abschnitt 8.5 vorgestellten Maßnahmenauswahl und -priorisierung. Abschließend wird die ereignisorientierte Produktionssteuerung in Abschnitt 9.5.1 den in Kapitel 4 definierten allgemeinen und spezifischen Anforderungen gegenübergestellt und eine Kosten-Nutzen-Analyse zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit durchgeführt (vgl. Abschnitt 9.5.2).

9.2 Anwendungsbeispiel

9.2.1 Anwendungsszenario

Für die prototypische Anwendung des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung sowie für die simulationstechnische Umsetzung und Validierung wird ein beispielhafter Produktionsprozess eines Flugzeugzulieferers betrachtet. Im Fokus der Betrachtungen steht die Herstellung von faserverstärkten Strukturbauteilen mittels des Automated Fiber Placement (AFP)-Verfahrens. AFP ist ein vollautomatisierter Fertigungsprozess zur Herstellung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffbauteile (CFK-Bauteile). Dabei werden faserverstärkte Kunststoffbänder robotergeführt unter Anwendung von Druck und Temperatur entlang eines vorgegebenen Pfads auf einer dreidimensionalen Werkzeugoberfläche abgelegt und mittels Messern abgelängt. Die Bänder bestehen aus sog. Prepregmaterial. Prepregs sind Halbzeuge aus vorimprägnierten Fasergebilden (FLEMMING ET AL. 1999).

Der Handlungsbedarf zur Anwendung einer ereignisbasierten Produktionssteuerung ergibt sich aufgrund verschiedener komplexer Zusammenhänge innerhalb des AFP-Prozesses. Die hohe Bauteilvielfalt, eine komplexe Prozessführung und der

variable Materialverbrauch erschweren ein vorausschauendes Materialmanagement, sodass aktuell ein Materialwechsel nach fixen Regeln durchgeführt wird. Ebenso resultieren die mangelnde Betriebsmittelüberwachung und -bereitstellung und die fehlende automatisierte Steuerung von erforderlichen Instandhaltungsarbeiten oft in häufigen Anlagenstillständen. Für den Produktionssteuerer stellt die optimale Einplanung von Material- und Messerwechseln an den AFP-Anlagen eine große Herausforderung dar. Dabei gilt es, einen geringen Materialverbrauch sowie eine effiziente Nutzung der eingesetzten Ressourcen bei gleichzeitig geringen Stillstandszeiten zu erzielen. Hierzu müssen Maßnahmen ergriffen werden, um ereignisbasiert optimale Zeitpunkte für die Material- und Messerwechsel zu ermitteln und diese umzusetzen. Es besteht daher der Bedarf, eine Entscheidungsunterstützung zu bieten und die optimalen Zeitpunkte für die Einplanung der erforderlichen Arbeitsvorgänge in Abhängigkeit von den aktuellen Produktionsabläufen zu bestimmen.

9.2.2 Produktionstechnisches System

Im Rahmen des vorliegenden Unterkapitels erfolgt zunächst eine kurze Beschreibung des AFP-Prozesses (vgl. Abbildung 42) zur Erläuterung der Randbedingungen und zur Abgrenzung des Betrachtungsbereichs.

Zu Beginn wird das Auflegewerkzeug aus dem Werkzeuglager entnommen und bei Bedarf gereinigt bzw. gewartet. Anschließend erfolgt das Eintakten in den Produktionsablauf. Das Auflegewerkzeug stellt die Positivform des zu fertigenden Bauteils dar und bestimmt somit dessen endgültige Geometrie (LENGSFELD ET AL. 2014). Für die Bearbeitung des CFK/GFK-Materials ist es notwendig, dieses aus dem Kühlhaus (Minusgrade) in das Auftaulager (Raumtemperatur) umzulagern (PHILIPP 2014). Der sog. Tack (dt. Klebrigkeit) des Prepregmaterials bestimmt die Haftung der einzelnen Lagen untereinander und ist von verschiedenen Faktoren, wie beispielsweise der Temperatur, dem Harzgehalt und dem Alter des Materials, abhängig. Daraus resultiert ein Tack-Life, das die Haltbarkeit der Prepregspulen beschreibt. Dieses beginnt sobald sich das Prepregmaterial im Auftaulager befindet. Weiterhin werden die Glasfasersichten wie im Fertigungsauftrag vorgegeben zugeschnitten (LENGSFELD & TURNER 2014). Bevor das Prepregmaterial platziert werden kann, wird manuell eine Glasfaserschicht auf das Auflegewerkzeug gelegt. Im Anschluss daran werden die CFK-Schichten vollautomatisch durch den AFP-Roboter gelegt, wodurch die sog. Preform entsteht. Als abschließende Lage wird wiederum per Hand eine Glasfaserschicht gelegt. Anschließend erfolgt die Tren-

nung der Preform und des Positivwerkzeugs. Die Preform wird in das Negativwerkzeug transferiert. Das für den weiteren Prozess nicht mehr benötigte Auflegewerkzeug wird gereinigt und nachfolgend wieder eingelagert. Im Anschluss an den Werkzeugtransfer wird unter Einsatz von Hilfsstoffen und einer Vakuumbaube ein Vakuum erzeugt. Besteht dieser Vakuumaufbau den anschließenden Dichtigkeits-test, so wird das Bauteil zum Aushärten freigegeben (LENGSFELD 2014). Das Aushärten, d. h. die Fixierung der Lagen, findet im Autoklaven unter Einfluss von Wärme und Druck statt (LENGSFELD 2014). Nach Abschluss des Aushärteprozesses wird der Vakuumaufbau abgebaut. Anschließend gilt es, das Aushärtewerkzeug und das Bauteil voneinander zu lösen und in einem weiteren Schritt das verwendete Aushärtewerkzeug zu reinigen und einzulagern.

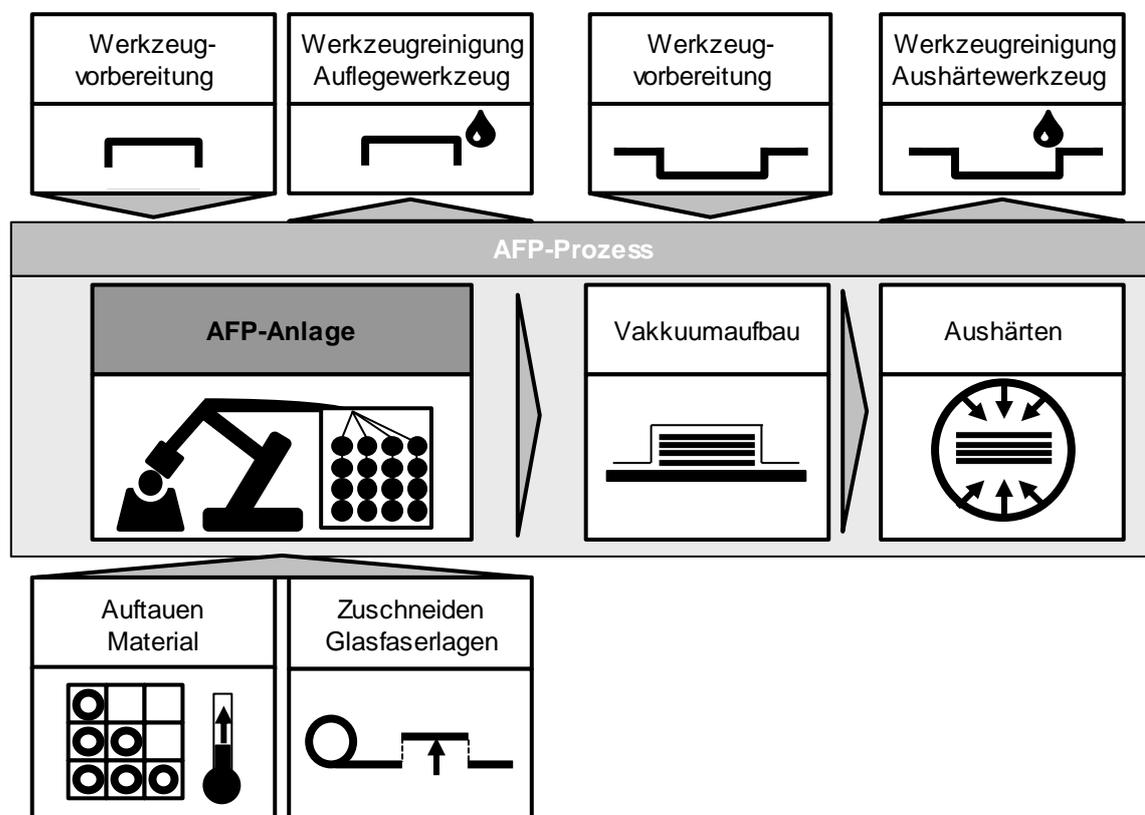


Abbildung 42: Überblick zum Ablauf des AFP-Prozesses

Als Grundlage für die Modellierung der CFK-Serienproduktion in einer ausgewählten Simulationsumgebung muss die Systemgrenze des betrachteten Produktionssystems definiert werden. Es gilt, sowohl für das System relevante Randbedingungen als auch charakteristische Ein- und Ausgangsgrößen in der Simulation zu berücksichtigen und zu modellieren (FELDMANN & REINHART 2000). Eine besondere Bedeutung bei der Definition der Systemgrenzen kommt der Zielbeschreibung der Simulationsstudie zu (WENZEL ET AL. 2008).

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

Basierend auf den folgenden angestrebten Zielen erfolgt die Abgrenzung des Systems:

- Reduzierung der Verlustkosten
- Minderung des Materialverlusts
- Reduzierung der Durchlaufzeiten
- Steigerung der Anlagenproduktivität

Im Hinblick auf diese Zielformulierung nimmt die AFP-Einheit eine bedeutende Rolle ein. Als Engpasssystem der Serienfertigung determiniert sie die Ausbringungsmenge und somit die Durchlaufzeiten und Anlagenproduktivität des gesamten Prozesses. Weiterhin sind die bei der Herstellung von Bauteilen verursachten Materialkosten maßgeblich dem AFP-System zuzuordnen. In diesem Prozessschritt erfolgt das Ablegen des Prepregmaterials. Zusätzlich zu der AFP-Anlage gilt es, noch verschiedene weitere Systembausteine zu berücksichtigen.

Im Rahmen der Simulation werden die Prozessschritte „Vorbereitung Auflegewerkzeug“ bis „Werkzeugtransfer“ berücksichtigt. Der manuelle Zuschnitt der Glasfaserlagen wird trotz der Zugehörigkeit zu den genannten Prozessschritten nicht berücksichtigt. Dieser erfolgt außerhalb der AFP-Anlage, weshalb die Annahme getroffen wird, dass die benötigten Glasfaserzuschnitte zur richtigen Zeit in ausreichender Quantität vorhanden sind. Aufgrund der Charakteristika des Prepregmaterials besteht die Notwendigkeit, die Materialversorgung mit zu berücksichtigen. Das Auftaulager dient dazu, die Spulen mit den Prepregbändern aus dem Kühlhaus aufzunehmen und aufzutauen. Mit der Einlagerung in das Auftaulager beginnt das Tack-Life. Nach Ablauf der Auftauzeit können die Spulen bei Bedarf entnommen und zur AFP-Anlage transportiert werden. Dabei wird die Anzahl der maximal verfügbaren Spulen durch die Größe des Lagers bestimmt. Dadurch werden die begrenzte Haltbarkeit des Prepregmaterials und der potenzielle Materialverlust im Simulationsmodell berücksichtigt. Zusätzlich zum Auftaulager wird das Werkzeuglager modelliert. Ausgehend von diesem wird die AFP-Anlage mit den Auflege- und Aushärtewerkzeugen der jeweiligen Bauteilvarianten versorgt. Die Werkzeuge werden nach dem Gebrauch ausgespannt, gereinigt und wieder eingelagert. Eine erneute Reinigung vor dem Einsteuern in den Materialfluss ist möglich. Die Fördervorgänge werden ebenso in der Modellbildung berücksichtigt, da die hier erfassten Daten als Grundlage für die Mustererkennung dienen (vgl. Abschnitt 9.3.3).

Die AFP-Anlage (siehe Abbildung 43) setzt sich aus einem AFP-Roboter und zwei Positioniervorrichtungen zusammen.

9.3 Anwendung des Systems zur ereignisorientierten Produktionssteuerung



Abbildung 43: Automated Fiber Placement (AFP)-Prozess
in Anlehnung an PIELMEIER ET AL. (2018b)

Aus dem Auftaulager entnommene CFK-Spulen werden auf einem Spulengatter positioniert. Von dort werden die einzelnen schmalen CFK-Bändchen (engl. Tows) an den Ablegekopf des Roboters geführt. Die Anzahl der Spulen (bis zu 32) und die Breite der jeweiligen Tows sind von der gewählten Ablegekopfkonfiguration abhängig (LENGSFELD & LACALLE 2014). Um die Produktivität der AFP-Einheit zu erhöhen, sind zwei Positioniervorrichtungen vorhanden, an denen der AFP-Roboter alternierend arbeiten kann. Bei einem Wechsel der Positioniervorrichtung kann der Roboter nicht direkt mit maximaler Ablegegeschwindigkeit betrieben werden. Der Ablegekopf muss ausreichend erwärmt werden, um das Harz der Prepregs aufzuschmelzen und somit die Tows fixieren zu können. Erst wenn die benötigte Temperatur erreicht ist, werden die Schichten mit der maximalen Ablegegeschwindigkeit platziert.

9.3 Anwendung des Systems zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

9.3.1 Allgemeines

Im Rahmen des vorliegenden Abschnitts wird die Anwendung des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung in den Fokus der Betrachtungen gestellt.

Basierend auf den Ansätzen aus Kapitel 6 erfolgt in einem ersten Schritt die Ereignismodellierung des Produktionsprozesses (vgl. Abschnitt 9.3.2). Darauf aufbauend werden Regeln für die Ereignisverarbeitung abgeleitet. Parallel dazu wird die Data-Mining-basierte Mustererkennung am Beispiel der intralogistischen Prozesse für den AFP-Prozess dargestellt (vgl. Abschnitt 9.3.3). Anhand der Ergebnisse der Datenanalyse wird eine Regel für die Ereignisverarbeitung abgeleitet. Anschließend wird die Maßnahmenauswahl (vgl. 9.3.4) mithilfe der Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung in Abschnitt 9.4 simulationsgestützt anhand unterschiedlicher Maßnahmenzenarien für das Anwendungsbeispiel umgesetzt und validiert.

9.3.2 Ereignismodellierung und Regelableitung

Für die Gestaltung einer ereignisbasierten Produktionssteuerung sind die Modellierung der relevanten Prozessabläufe sowie Einflussgrößen und deren Abhängigkeiten Grundlage für die weitere Gestaltung der Ereignisverarbeitung. In einem ersten Schritt werden die vorhandenen Prozess- und Produktionsdaten strukturiert und aufbereitet. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für die Modellierung der Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den relevanten Ereignissen des Produktionsprozesses. Es gilt, die erforderlichen Daten zur Reduzierung von Stillstandszeiten zu ermitteln und zu strukturieren. Die Ergebnisse der Ereignismodellierung dienen als Basis für die nachfolgenden Schritte und werden in Form eines Ereignismodells der Prozessabläufe dokumentiert. Auf Basis des in Abschnitt 6.4 entwickelten Modellierungsansatzes werden die logischen, kausalen und temporalen Zusammenhänge für den Rollen- und Messerwechsel des AFP-Prozesses modelliert. Die Ereignismuster werden dabei mittels der Ereignisregelcontainer übersichtlich dargestellt und dokumentiert.

Definition Eingriffsgrenzen

Die zu betrachtenden Ereignisse *Spulenwechsel* und *Messerwechsel* werden im Folgenden als Aufträge behandelt, die nach der Initiierung der Maßnahmenpriorisierung kostenoptimiert in die Fertigung einzuplanen sind. Die Unterschreitung der Kennzahl „Restkapazität Spule“ sowie „Restkapazität Messer“ sind Auslöser für den Anstoß des Optimierungsverfahrens. Hierbei gilt, dass, sobald die vorhandenen Restkapazitäten von Spulen und Messern die erforderlichen Werte für das Legen der nächsten Lage unterschreiten, die Optimierung zur Ermittlung geeigneter Maßnahmen angestoßen wird. Die Restkapazität der Spule wird über die Länge des noch zur Verfügung stehenden Materials bestimmt und durch den Parameter

v_{st} dargestellt. Im Gegensatz zu einer Verhältniszahl muss durch die Betrachtung der absoluten Restlänge bei der Verwendung von Spulen mit anderen Materiallängen die Eingriffsgrenze nicht typabhängig angepasst werden. Die Restkapazität des Messers berechnet sich über die Anzahl der bereits getätigten Schnitte b_{mt} .

Für die Ereignisbehandlung wird die Ereignisregel formuliert (vgl. Abbildung 44), um das Anwendungssystem der Optimierung anzustoßen. Nachfolgend ist exemplarisch die Ereignisregel für den Spulenwechsel in Form einer CQL EPL dargestellt.

```
SELECT StreamTapes.component, StreamTapes.layerT
FROM StreamTapes
JOIN order ON StreamTapes.component=order.component
WHERE StreamTapes.Tape_i<order.remainingmaterial_limit
```

*Abbildung 44: Abgeleitete Ereignisregel aus
der Ereignismodellierung in CQL EPL*

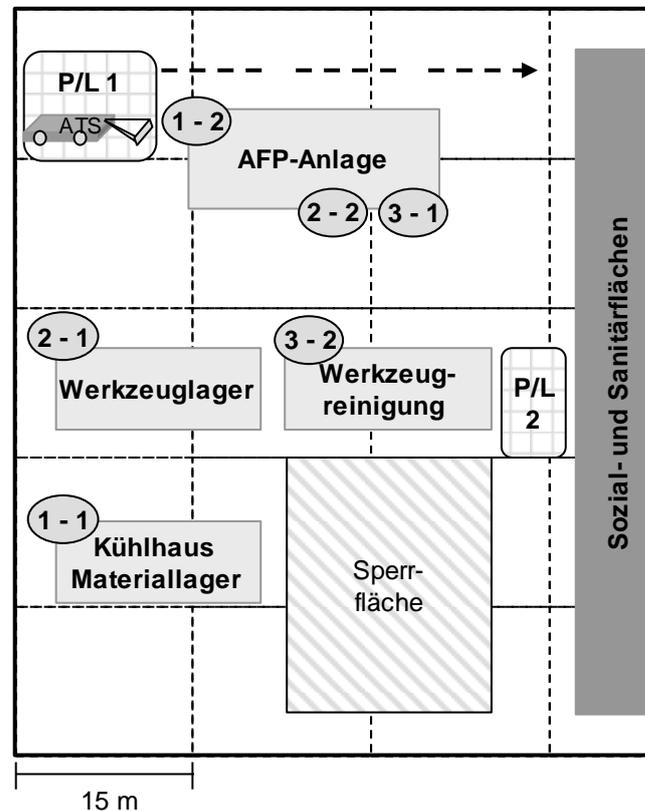
Für den regelbasierten Ansatz können die Kennzahlen sowie die Eingriffsgrenzen in Kennzahlentemplates dokumentiert werden. So wird die Optimierung auch dann angestoßen, wenn aufgrund eines unerwarteten Ereignisses die Stillstandszeiten mehr als 20 Minuten betragen. Durch dieses Vorgehen sollen Synergieeffekte erzielt werden, da nach einer längeren Stillstandszeit der AFP-Prozess stets mit einer verringerten Bearbeitungsgeschwindigkeit wieder gestartet werden muss.

9.3.3 Mustererkennung und Regelableitung

Der hier betrachtete AFP-Prozess befindet sich in der Anlaufphase, weshalb die Verfügbarkeit von ausgewählten Parametern und Daten zur Mustererkennung nicht vollumfänglich gewährleistet ist. Aus diesem Grund werden die Regeln für die Ereignisverarbeitung wie in Abschnitt 9.3.2 in erster Linie mithilfe von Expertenwissen abgeleitet. Der Spulen- und Messerwechsel erfolgt in der aktuellen Produktion auf Basis einer feststehenden Regel, um die Komplexität der Produktionsplanung zu reduzieren. Die historischen Daten geben somit diese Regel wieder und sind nicht geeignet, um Assoziationen bzgl. des Spulen- oder Messerwechsels zu untersuchen.

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

Basierend auf den aufgeführten Einschränkungen und aufgrund der vorliegenden Datenverfügbarkeit werden die Data-Mining-Ansätze zur Mustererkennung bezogen auf die erforderlichen intralogistischen Transportprozesse angewandt. Hierfür wurde eine Simulation mit autonomen Transportsystemen (ATS) erstellt, die die AFP-Anlage mit Material und Werkzeugen versorgen (vgl. Abbildung 45).



Legende:



: Park und Ladebereich



: Einbahnstrasse



: Annahmeort des Prozess x



: Abgabeort des Prozess x

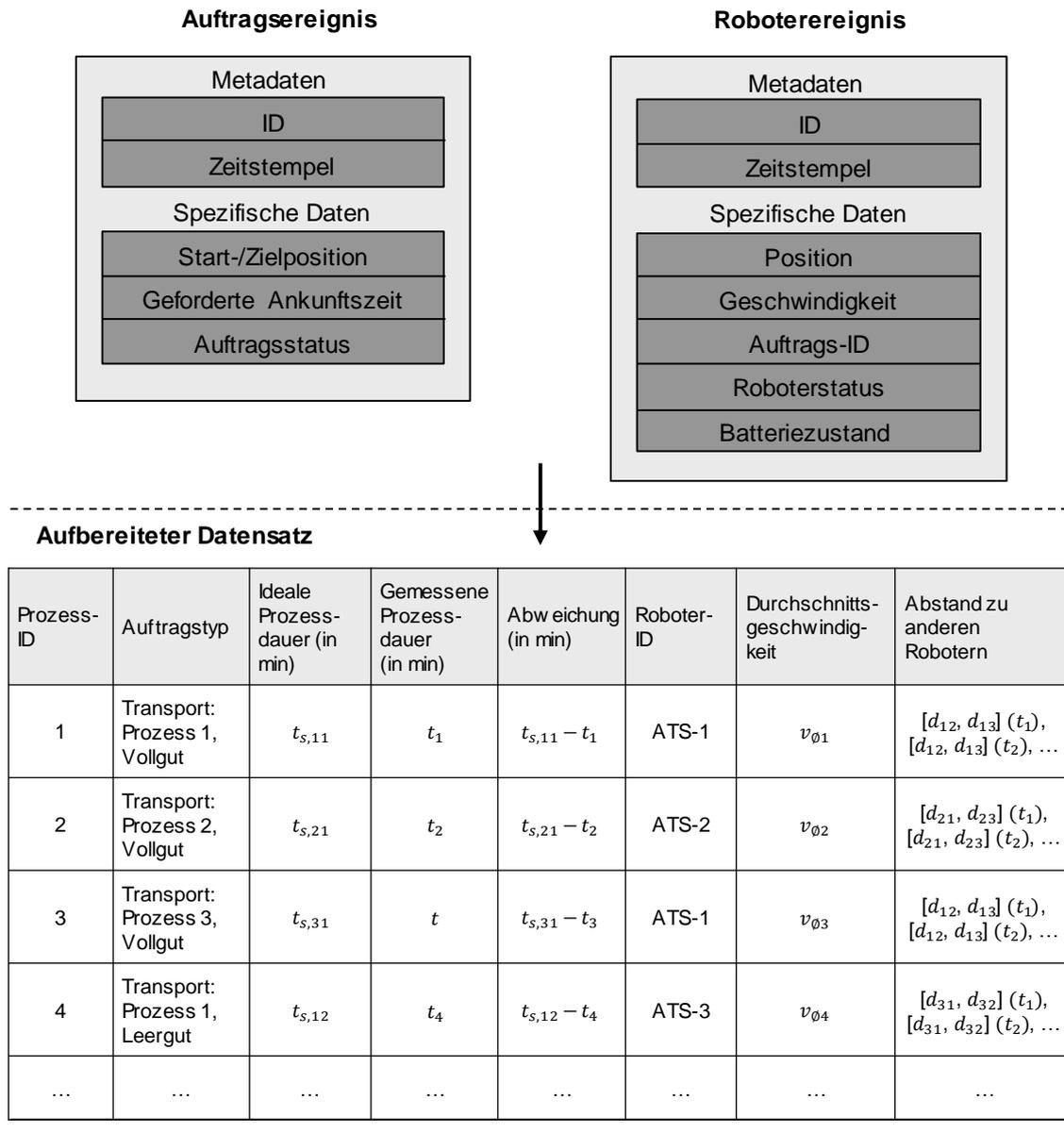
Abbildung 45: Relevante Stationen des AFP-Materialflusses

Nachfolgend wird die Analyse der Transportdaten hinsichtlich des Auftretens starker Zusammenhänge anhand des FP-Growth Algorithmus sowie der Aufdeckung sequenzieller Zusammenhänge durch den GSP-Algorithmus beschrieben.

Die mittels der Simulation generierten und persistent gespeicherten Ereignisse der ATS-Flottensimulation dienen als Rohdaten für die Anwendung der in Abschnitt 7.3.3 beschriebenen Assoziationsanalyse. Zur Versorgung der AFP-Anlage werden für das vorliegende Produktionsszenario drei ATS eingesetzt. Zur Anwendung der Data-Mining-Methoden ist eine Datenvorverarbeitung erforderlich. Im

9.3 Anwendung des Systems zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

vorliegenden Anwendungsszenario werden die Auftrags- und Roboterzustandsergebnisse zunächst aggregiert und zusätzliche Kennzahlen berechnet (vgl. Abbildung 46).



Legende:

$t_{s,xy}$: Ideale Prozessdauer des Teilprozesses y von Prozess x

t_x : Gemessene Prozessdauer des Prozesses x

$[d_{xy}, d_{xz}] (t_i)$: Abstand eines ATS x zu den ATS y und z zur Zeit i

$v_{\emptyset x}$: ATS-Durchschnittsgeschwindigkeit bei Prozess x

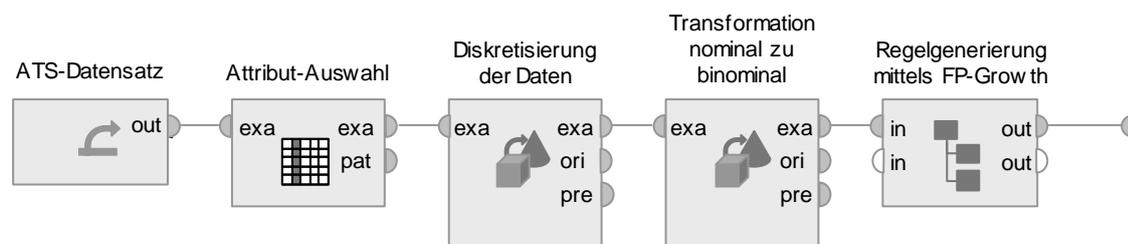
Abbildung 46: Beispielhafte Ereignisaggregation als Vorbereitung für die Assoziationsanalyse

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

In dieser Arbeit wird eine Assoziationsanalyse durchgeführt, die Korrelationen zwischen den eingetretenen Ereignissen ermittelt und die Zusammenhänge als Regelsatz ausgibt. Für die Vermeidung einer mangelnden Versorgung der AFP-Anlage mit Material bzw. Werkzeugen ist eine frühzeitige Detektion von Unregelmäßigkeiten in den Transportprozessen entscheidend. Detektierte Abweichungen dienen als Ausgangspunkt für eine Assoziationsanalyse, durch die Ursachen und Fehlerverkettungen ermittelt werden. Die Anwendung von Data-Mining-Methoden erfordert zunächst eine Datenvorverarbeitung.

Für die Durchführung der Assoziationsanalyse mittels des FP-Growth Algorithmus sowie die Erkennung sequenzieller Muster mithilfe des GSP-Algorithmus wird die Data-Mining-Umgebung Rapidminer genutzt. Rapidminer bietet eine grafische Benutzeroberfläche, in der ein Data-Mining-Prozess in Form von miteinander verbundenen Funktionsblöcken gegliedert und dargestellt wird. Die Funktionsblöcke sind die Basis für die Datenverarbeitung.

Mithilfe der Assoziationsanalyse wird ein Zusammenhang zwischen der Anzahl der nötigen Umplanungen (Disruptions), der Durchschnittsgeschwindigkeit beim Transportvorgang und der prozentualen Abweichung der Prozesszeiten von den Idealwerten ermittelt. Abbildung 47 zeigt die erforderlichen Funktionsblöcke zur Durchführung der Assoziationsanalyse in Rapidminer. Ebenso sind exemplarisch die gefundenen Korrelationen für eine signifikante Abweichung von mehr als 50 % der gemessenen Transportzeiten von den Vorgabezeiten dargestellt. Ursache für die Abweichungen ist die hohe Anzahl von Umplanungen.



No.	Premises	Conclusion	Support	Confidence	Lift
19	Disruptions => 20	Avg. speed [m/s] = 0,34-0,4; Deviation [%] => 50 %	0,087	0,667	1,917
28	Disruptions => 20	Deviation [%] => 50 %	0,130	1	2,300
29	Avg. speed [m/s] = < 0,34	Deviation [%] => 50 %	0,087	1	2,300
33	Avg. speed [m/s] = 0,34-0,4; Disruptions => 20	Deviation [%] => 50 %	0,087	1	2,300

Abbildung 47: Verarbeitungsblöcke und gefilterte Ergebnisse der Assoziationsanalyse mittels FP-Growth Algorithmus (Rapidminer)

9.3 Anwendung des Systems zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

In einem zweiten Analyseschritt wird mithilfe des GSP-Algorithmus der Zusammenhang zwischen der Anzahl der Umplanungen und der verspäteten Transporte genauer untersucht. Dieser Algorithmus verarbeitet eine Liste von Ereignissequenzen, die aus den aggregierten Ereignissen gewonnen wird. Jeder Transportprozess wird dazu in Subprozesse gegliedert, deren Reihenfolge auf Basis der Ereigniszeitstempel ermittelt wird. Für die Ermittlung temporaler Zusammenhänge werden die Transportprozesse des Anwendungsszenarios separat betrachtet, da der GSP-Algorithmus keine Zuordnung von Sequenzen zu dedizierten Prozessen zulässt. Es werden drei unterschiedliche Transportstrecken zur Versorgung des AFP-Prozesses definiert. Prozess 1 umfasst die Strecke vom Kühlhaus zur AFP-Anlage. Prozess 2 beinhaltet den Weg vom Werkzeuglager zur AFP-Anlage und Prozess 3 die Strecke von der AFP-Anlage zur Werkzeugreinigung. Der Aufbau dieses Rule-Mining-Prozesses wird in Abbildung 48 gezeigt.

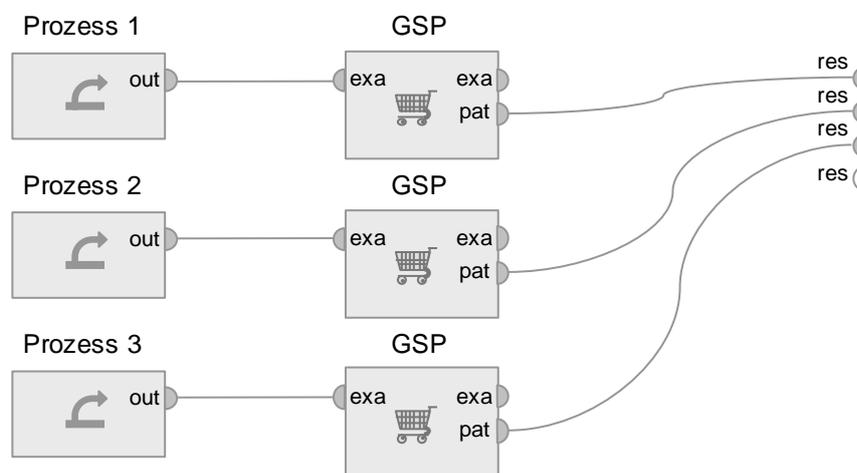


Abbildung 48: Funktionsblöcke der sequenziellen Assoziationsanalyse mittels GSP-Algorithmus (Rapidminer)

Bei Prozess 1 und Prozess 3 wird eine temporale Abhängigkeit zwischen der ursprünglichen Parkzone eines Transportroboters, einer erhöhten Anzahl an Umplanungen und einer verspäteten Transportgutzustellung erkannt. Anhand einer Analyse des Hallenlayouts und der gewählten Roboterpfade wird identifiziert, dass für die Abweichungen die vorhandenen Sozial- und Sanitärflächen in der Halle verantwortlich sind, da häufige Interaktionen mit Mitarbeitern zu Irritationen führen. Dies lässt sich im Prozess der Auftragsvergabe bei der Roboterwahl mithilfe einer fixen Regel berücksichtigen. Abbildung 49 stellt die Ergebnisse der sequenziellen Assoziationsanalyse dar.

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

Prozess 1:

Support	Transactions	Items	Transaction 0	Transaction 1	Transaction 2
0,500	3	3	PB	>20	notInTime
0,500	3	3	PA	<20	inTime

Prozess 2:

Support	Transactions	Items	Transaction 0	Transaction 1	Transaction 2
0,500	3	3	PB	<20	inTime
0,500	3	3	PA	<20	inTime

Prozess 3:

Support	Transactions	Items	Transaction 0	Transaction 1	Transaction 2
0,500	3	3	PB	>20	notInTime
0,500	3	3	PA	<20	inTime

Legende:

PA: Parkzone 1 : notInTime: Transportgut wird verspätet zugestellt

PB: Parkzone 2 : inTime: Transportgut wird rechtzeitig zugestellt

</> 20 : Anzahl der Umplanungen

Abbildung 49: Ergebnisse der sequenziellen Assoziationsanalyse mittels GSP-Algorithmus (Rapidminer)

In der CEP-Engine wird dazu folgende Regel implementiert (vgl. Abbildung 50), die exemplarisch für den ersten Prozess diejenigen Robotersysteme auswählt, die verfügbar sind (d. h. = Idle) und sich nicht in der zweiten Parkzone befinden:

```
SELECT *, 'TransportJobCandidate' AS 'EventType'  
INTO Output  
FROM Jobs job  
JOIN Ats ats  
ON job.Plant = ats.Plant  
WHERE job.Process LIKE 'Process_1' ats.Status LIKE 'Idle' AND ats.Position  
NOT LIKE 'ParkingArea_2'
```

Abbildung 50: Abgeleitete Ereignisregel aus der Assoziationsanalyse in CQL EPL

9.3.4 Maßnahmenauswahl und -priorisierung

Nachfolgend werden die Schritte der Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung anhand der Steuerung der Wechselzeitpunkte für den AFP-Prozess detailliert erläutert.

Maßnahmeninitiierung

Aufgrund der Tatsache, dass es sich bei der AFP-Anlage um eine Engpassmaschine handelt, ergibt sich bei Ausfall der Maschine ein hoher zu erwartender Schadenswert. Regeln, die zu der Erkennung eines Stillstands der Anlage und der Auslösung von Gegenmaßnahmen dienen, sind somit hoch zu priorisieren und in einem EPN anzuordnen. Die Regeln zur Steuerung der Intralogistik werden daher in einem separaten EPN gegliedert werden. Als Stufe für den Automatisierungsgrad wird für die Steuerung der AFP-Anlage Stufe 6 (Mensch hat Vetorecht, ansonsten erfolgt die Ausführung) gewählt. Für die Steuerung der intralogistischen Prozesse wird hingegen Stufe 10 (Computer entscheidet und handelt autonom) gewählt.

Kennzahlen und Gewichtung der Kennzahlen

Durch Expertengespräche wurde ermittelt, dass für den vorliegenden Anwendungsfall die zentrale Zielsetzung die Reduzierung der wechselbedingten Stillstandsdauer ist und dadurch die Reduzierung der Herstellkosten angestrebt wird.

Maßnahmenkatalog

Basierend auf dem Maßnahmenkatalog aus Abschnitt 8.4.2 sowie der Priorisierung der Kennzahl Stillstandsdauer können anhand der Ursache-Wirkungs-Matrix aus Abschnitt 8.5.3 die infrage kommenden Maßnahmen entsprechend eingegrenzt werden. Darüber hinaus schränken die produktionstechnischen Gegebenheiten und die technologischen Randbedingungen die Auswahl von Maßnahmen ein. Ein Überblick über die zielführenden Maßnahmen sowie eine Detaillierung der Maßnahmen sind in Tabelle 7 dargestellt.

Die drei zur Optimierung zur Verfügung stehenden Maßnahmen (Änderung des Soll-Endtermins, Vorziehen von Aufträgen und Zusammenfassen von Arbeitsvorgängen) beeinflussen dabei die Stillstandszeiten.

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

Tabelle 7: Beispielhafter Maßnahmenkatalog zur Reduzierung der Stillstände

	Maßnahme	Beschreibung
Auftragsfreigabe	Ändern des Soll-Endtermins	Über die Erfassung der Restkapazität kann der notwendige Wechsel einer Komponente berechnet und geplant werden. Durch Änderung des Soll-Endtermins ist es möglich, den Wechsel zu Zeitpunkten mit positiven Synergieeffekten vorzunehmen.
Reihenfolgebildung	Vorziehen von Arbeitsvorgängen	Der Wechsel von Spulen oder Messern setzt den Stillstand der Maschine voraus und bedingt nachfolgend eine verlangsamte Bearbeitungsgeschwindigkeit. Aufgrund dessen ist zu überprüfen, wie sich zum Zeitpunkt des geplanten Wechsels der vorzeitige Wechsel der zweiten Komponente auf die Kostenfunktion auswirkt.
	Zusammenfassen von Arbeitsvorgängen	Bei der Notwendigkeit eines gleichzeitigen Messer- und Spulenwechsels kann die zeitliche Abfolge des Wechselvorgangs gesteuert werden. Hierbei besteht die Möglichkeit, den Wechsel konsekutiv oder teilweise parallel durchzuführen.

Mithilfe gemischt-ganzzahliger Optimierung soll der optimale Zeitpunkt für den Spulen- und Messerwechsel im AFP-Prozess bestimmt werden. Es wird ein Entscheidungsmodell erstellt, welches das Ergebnis an die Produktionssteuerung und -planung übergibt. Ziel ist es, den Spulen- und Messerwechsel kostenminimal in den Produktionsprozess zu integrieren, wobei gleichzeitig ein geringer Materialverbrauch sowie niedrige Stillstandszeiten realisiert werden sollen.

Die Anlage muss gestoppt werden, um aufgebrauchte Spulen und abgenutzte Messer gegen ein neues Set auszutauschen. Es kann jedoch sinnvoll sein, während eines Anlagenstillstands mehrere Spulen und Messer gleichzeitig zu tauschen, auch wenn diese noch eine Restverwendungsdauer haben, da nach jedem Stillstand eine Anfahrzeit der Anlage anfällt, in welcher der Legeprozess nur mit gedrosselter Geschwindigkeit stattfinden kann. Demzufolge entsteht ein Zielkonflikt zwischen den Kosten, die bei jedem Wechselvorgang durch den Maschinenstillstand entstehen und den Kosten für ungenutztes Material, falls eine Spule oder ein Messer ausgetauscht wird, obwohl sie noch weiterverwendet werden könnten. Der Wechsel ist immer möglich, sobald eine Lage vollständig gelegt worden ist.

Aus dem Produktionsprogramm, das den geplanten Materialverbrauch je Spule und Lage enthält, kann berechnet werden, welche Restlänge jede der Spulen nach dem Fertigstellen einer Bauteillage hat und welche Restkapazität jedes der Messer besitzt, d. h. wie viele mögliche weitere Schnitte mit diesem gemacht werden können. Daraus lässt sich der Wert des Restmaterials jeder Spule bzw. jedes Messers ableiten. Außerdem ist bekannt, wie viel Zeit das Wechseln einer Spule und eines Messers benötigt. Die Kosten für den Stillstand der Anlage sowie für die Anfahrzeit lassen sich mithilfe des Maschinenstundensatzes für jede Anzahl von Spulen- und Messerwechseln berechnen. Aus einer mathematischen Abwägung der genannten Faktoren kann ein Zeitplan erstellt werden, der vorgibt, nach welcher Lage welche Spulen und Messer ausgetauscht werden sollen.

Darüber hinaus gibt es weitere Gründe für unvermeidliche Anlagenstillstände. Die Stillstände können genutzt werden, um Messer und Spulen zu tauschen, sodass die Anlage zu keinem späteren Zeitpunkt speziell dafür abgeschaltet werden muss. Planmäßige Gründe für das Abschalten der Anlage sind regelmäßige Wartungs- und Reinigungsprozesse. Diese können bereits bei der Bestimmung des planmäßigen Zeitplans des Spulen- und Messerwechsels berücksichtigt werden, während außerplanmäßige Gründe für den Anlagenstillstand gesondert betrachtet werden. Hierzu zählen Ausfälle aufgrund von gebrochenen Messern, Ablagefehlern oder sonstigen Fehlern. Tritt ein außerplanmäßiger Anlagenstillstand auf, so muss kurzfristig geprüft werden, ob es sinnvoll ist, die Stillstandszeit zu nutzen, um den Wechsel von einzelnen Spulen oder Messern vorzuziehen. Falls die Entscheidung zugunsten eines Wechsels fällt, muss der Zeitplan für den planmäßigen Spulen- und Messerwechsel aufgrund der aktualisierten Informationen bezüglich des Restmaterials der Spulen und der Restkapazität der Messer aktualisiert werden.

Nachfolgend wird die Zielfunktion in Formel (13) dargestellt.

Zielfunktion

$$\begin{aligned}
 \text{Min } K = & \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} z_{st} \cdot c^{\text{Spule}} + \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} q_{mt} \cdot c^{\text{Messer}} \\
 & + \sum_{t \in T} k_t \cdot c^{\text{Maschine}} + \sum_{t \in T} n_t \cdot a_t \cdot c^{\text{Maschine}}
 \end{aligned} \tag{13}$$

Mengen:

$t \in T := \{1, \dots, T^{\text{max}}\}$ Perioden, Zeitpunkte mit Wechselmöglichkeit (nach Fertigstellung einer Lage)

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

$s \in S := \{1, \dots, S^{max}\}$ Menge der Spulen, S^{max} entspricht der Anzahl an Spulen

$m \in M := \{1, \dots, M^{max}\}$ Menge der Messer, M^{max} entspricht der Anzahl an Messer

Entscheidungsvariablen:

z_{st} Abfall der Spule s in Periode t

q_{mt} Nicht genutzte Messerschnitte des Messers m in Periode t

k_t Stillstandszeit in Periode t

n_t Binärvariable; ist 1, falls Messer oder Spulen in Periode t gewechselt werden; ansonsten 0

Parameter:

c^{Spule} Materialwert

$c^{Maschine}$ Maschinenstundensatz

a_t Anfahrzeit in Periode t

c^{Messer} Kosten von einem Messerschnitt

d^{Messer} Dauer für das Wechseln des Messersatzes

Nebenbedingungen

Die Berechnung der Spulenrestlängen für jede Periode ist in Formel 14 dargestellt. Die Restlänge berechnet sich aus der Restlänge in der Vorperiode abzüglich des Verbrauchs in der betrachteten Periode. Falls die Spule ausgetauscht wird, wird die Kapazität einer neuen Spule addiert. Zudem wird der Abfall, der in der Periode angefallen ist, abgezogen. Dabei gilt es, die Nebenbedingungen (15) bis (18) zu berücksichtigen.

$$r_{st} = r_{s,t-1} + KAP^{Spule} \cdot x_{st} - z_{st} - v_{st} \quad \forall t \in T, s \in S \quad (14)$$

Berechnung des Abfalls:

$$z_{st} \leq KAP^{Spule} \cdot x_{st} \quad \forall t \in T, s \in S \quad (15)$$

9.3 Anwendung des Systems zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

$$z_{st} \leq r_{s,t-1} \quad \forall t \in T, s \in S \quad (16)$$

$$z_{st} \geq r_{s,t-1} - KAP^{Spule} \cdot (1 - x_{st}) \quad \forall t \in T, s \in S \quad (17)$$

$$z_{st} \geq 0 \quad \forall t \in T, s \in S \quad (18)$$

Eine Spule ($x_{st} = 1$) muss gewechselt werden, wenn $r_{st} \leq G^{Spule}$ Restlänge kleiner gleich Grenzwert ist. Somit ergibt sich folgende Nebenbedingung (19):

$$r_{st} \geq G^{Spule} \quad \forall t \in T, s \in S \quad (19)$$

Entscheidungsvariablen:

x_{st}	Binärvariable; ist 1, falls Spule s in Periode t gewechselt wird; ansonsten 0
r_{st}	Restlänge der Spule s in Periode t
z_{st}	Abfall der Spule s in Periode t

Parameter:

v_{st}	Materialverbrauch der Spule s in Periode t
KAP^{Spule}	Kapazität einer neuen Spule (Länge)
G^{Spule}	Grenzwert der Kapazität der Spule (spätester Tauschzeitpunkt)

Die Restkapazität der Messer sowie der verschwendeten Messerschnitte ist analog zu den Spulen zu berechnen. Für das Wechseln eines Messers gelten die gleichen Bedingungen wie für den Spulenwechsel. Zusätzlich gibt es folgende Nebenbedingung (20), die festlegt, dass beim Wechseln eines Messers der gesamte Messerblock gewechselt werden muss.

$$\frac{\sum_{m \in M} y_{mt}}{M^{max}} = o_t \quad \forall t \in T \quad (20)$$

Entscheidungsvariable:

y_{mt}	Binärvariable; ist 1, falls Messer m in Periode t gewechselt wird; ansonsten 0
----------	--

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

Mithilfe der Formel (21) wird bestimmt, ob es in Periode t einen Stillstand gibt:

$$\frac{\sum_{s \in S} x_{st}}{s^{max}} \leq w_t \quad \forall t \in T \quad (21)$$

Entscheidungsvariable:

w_t Binärvariable; ist 1, falls es in Periode t einen Stillstand gibt

Nicht-Negativitäts-Bedingungen und Binärvariablen:

$$w_t \in \{0,1\} \quad \forall t \in T$$

$$z_{st} \geq 0 \quad z_{st} \geq 0$$

$$x_{st} \geq 0 \quad \forall t \in T, s \in S$$

Die gesamte Stillstandszeit in einer Periode berechnet sich aus dem Maximum der Stillstandszeit durch Messer- und Spulenwechsel, wie in Formel (22) und (23) beschrieben. Diese können parallel stattfinden.

$$k_t \geq \sum_{s \in S} x_{st} \cdot d^{Spule} \quad \forall t \in T \quad (22)$$

$$k_t \geq o_t \cdot d^{Messer} \quad \forall t \in T \quad (23)$$

Entscheidungsvariablen:

k_t Stillstandszeit in Periode t

o_t Binärvariable; ist 1, falls Messerblock in Periode t gewechselt wird; ansonsten 0

Parameter:

d^{Spule} Dauer für das Wechseln einer Spule s

d^{Messer} Dauer für das Wechseln des Messersatzes

Die Nebenbedingungen (24) und (25) bestimmen, ob es in Periode t zu einem Stillstand durch Messer- oder Spulenwechsel kommt:

$$n_t \geq \sum_{s \in S} x_{st} \quad \forall t \in T \quad (24)$$

$$n_t \geq \sum_{m \in M} y_{mt} \quad \forall t \in T \quad (25)$$

Entscheidungsvariablen:

y_{mt} Binärvariable; ist 1, falls Messer m in Periode t gewechselt wird; ansonsten 0

Da die Problemformulierung teilweise Binärvariablen enthält, handelt es sich um ein Problem der gemischt-ganzzahligen linearen Optimierung. Zur Lösung für diese Art der Problemformulierung werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Branch-and-Bound-Prinzip und die Software Matlab eingesetzt.

9.4 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung

9.4.1 Beschreibung der Umsetzung

Für die prototypische Umsetzung wurde ein Simulationsmodell des AFP-Prozesses in der Software Siemens Plant Simulation erstellt. Dieses dient als Eventgenerator, um die Potenziale des dynamischen Materialmanagements in verschiedenen Simulationsläufen aufzuzeigen. Die Simulation erzeugt einen Strom an Echtzeitdaten, welcher kontinuierlich mithilfe der in der CEP-Engine von Microsoft Azure hinterlegten Regeln analysiert wird. An den definierten Entscheidungspunkten wird die Optimierung angestoßen. Die Optimierung erfolgt hierbei über das Programm Matlab. Zur Ermittlung einer Maßnahme ist die Verknüpfung der Materialflusssimulation mit der Optimierung notwendig. Diese Kombination stellt sicher, dass für den aktuellen Zeitpunkt die optimale Entscheidung getroffen werden kann. Wird im Verlauf der Simulation ein steuerungsrelevantes Ereignis erkannt, berechnet die analytische Optimierung unter Einbeziehung der Stellgrößen die aktualisierten Wechselparameter. Diese werden anschließend an ein Feinplanungstool übergeben, bevor der Simulationsprozess mit den aktualisierten Parametern fortgesetzt wird. Die Feinplanung der Aufträge wird mittels eines von der Firma software4production GmbH zur Verfügung gestellten Feinplanungstools visualisiert. Daneben kommt für die Ableitung neuer Regeln die Softwareumgebung Rapidminer zum Einsatz. In Abbildung 51 ist ein Überblick über die verwendeten Softwareprodukte und deren Funktion dargestellt.

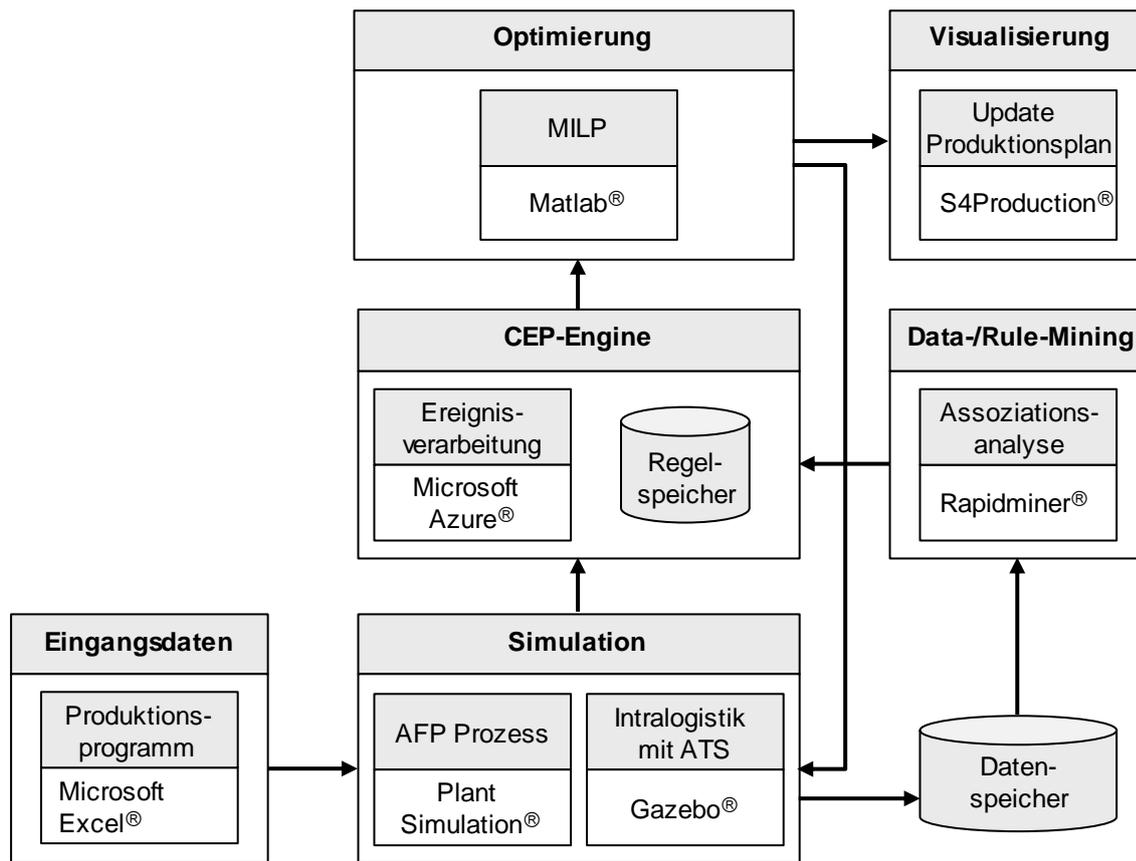


Abbildung 51: Aufbau und Schnittstellen des Systems zur ereignisorientierten Produktionssteuerung

Da die logistischen Ziele gegenläufig sein können, müssen sie geeignet zusammengeführt werden, um darauf basierend die Maßnahmen bewerten und eine zeitnahe Entscheidungsunterstützung realisieren zu können. Zur Ermittlung einer optimalen Konfiguration bietet es sich an, Verfahren der Simulation und Optimierung zu koppeln (vgl. PIELMEIER ET AL. 2018b). Dabei gibt es unterschiedliche Arten der Kopplung, welche nachfolgend näher erläutert werden. Zudem wird bezogen auf die Anforderungen der vorliegenden Arbeit die geeignete Kopplungsart abgeleitet.

Die Möglichkeiten einer Verknüpfung von Simulation und Optimierung sind in der VDI 3633 Blatt 12 2016 definiert. Es wird zwischen zwei verschiedenen Varianten unterschieden. Die Optimierung und die Simulation können sequenziell oder hierarchisch verknüpft werden (VDI 3633). Zudem existieren für diese beiden Verknüpfungsarten jeweils zwei Ausprägungen (Kategorie A bis D). Kategorie C beschreibt die Verknüpfung von Optimierung und Simulation, bei der die Simula-

tion die dominante Methode ist. Diese Kombination, die auch als Online-Optimierung bezeichnet wird, führt während des Simulationsdurchlaufs die Optimierungsmethode als Unterroutine aus. Während der Entscheidungsfindung der Optimierung wird der Simulationsdurchlauf pausiert.

Nachdem die für diesen Zeitpunkt optimalen Handlungen an die Simulation übergeben sind, wird die Simulation bis zur nächsten notwendigen Entscheidung fortgeführt. Die Simulation gibt das technische System wieder und die Entscheidungen werden mithilfe des integrierten Optimierungsverfahrens getroffen (VDI 3633).

9.4.2 Aufbau der Simulationsstudie

Für das dargelegte Produktionssystem werden verschiedene Simulationsszenarien definiert, die sich hinsichtlich der Konfiguration der Maßnahmenenergreifung unterscheiden, um die Leistungsfähigkeit des Steuerungssystems bewerten zu können (vgl. Abbildung 52).

	Szenario													
	0		I		II		III		IV		V		VI	
	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M	S	M
Eingreifen nur bei Bedarf	●				●									
Regelbasiertes Eingreifen			●											
Maßnahmen der Auftragsfreigabe														
Änderung Soll-Endtermin				●		●		●		●		●		●
Maßnahme der Reihenfolgebildung														
Vorziehen von AV							●		●					
Zusammenfassen von AV									●					●

Legende:

S : Spulenwechsel AV : Arbeitsvorgang
M : Messerwechsel

Abbildung 52: Überblick über die Szenarien der Maßnahmenauswahl

Alle Szenarien werden anschließend bezogen auf ihre logistische Zielerreichung miteinander verglichen, um das Potenzial aufzuzeigen, welches durch Einsatz der

ereignisbasierten Produktionssteuerung erzielt werden kann. Nachfolgend werden die Szenarien beschrieben.

Referenzszenario

Als Referenzwert (Szenario 0) wird eine Steuerung verwendet, bei der ausschließlich im Bedarfsfall ein Materialwechsel erfolgt.

Szenario I

Szenario I ist eine regelbasierte Steuerung. Die Bestimmung der Wechselzeitpunkte erfolgt auf Basis von fix hinterlegten Grenzwerten für die Restkapazität der Spule und der Messer. Die Regel besagt, dass ein Spulenwechsel durchgeführt wird, sobald die Restlänge der Spulen einen definierten Grenzwert G^{Spule} unterschreitet. Während dieser Produktionsunterbrechung werden zusätzlich alle Spulen dieser AFP-Anlage gewechselt, bei denen die Restlänge G^{Spule} unter einem definierten Wert liegt. Somit können die Kosten hinsichtlich zukünftiger Stillstände aufgrund eines Spulenwechsels einer einzelnen Spule reduziert werden. Der Wechsel des Messerblocks erfolgt, wenn ein Messer einen definierten Grenzwert G^{Messer} unterschritten hat.

Szenario II

Szenario II bildet eine Steuerung des Spulenwechsels basierend auf einer mathematisch analytischen Optimierung ab. Der Messerwechsel erfolgt auf Basis der feststehenden Grenzwerte für die Restkapazität.

Szenario III

Szenario III der mathematischen Optimierung berücksichtigt im Gegensatz zu Szenario II den Einfluss der verwendeten Messer auf die Optimierungsfunktion. Durch den Term $K_{Messer,t}$ fließen die Messerverlustkosten in die Optimierung mit ein und es ergibt sich die obenstehende Zielfunktion (Formel 13). Falls Messer und Spulen zum gleichen Zeitpunkt gewechselt werden können, erfolgt die Umsetzung des Wechsels konsekutiv.

Szenario IV

Szenario IV ist analog zu Szenario III aufgebaut, mit dem Unterschied, dass hier der teilweise parallele Wechsel von Spulen und Messern betrachtet wird.

Szenario V

Szenario V berücksichtigt neben dem Spulen- auch den Messerwechsel. Im Gegensatz zu Szenario III und IV gilt, dass Messer nicht im Satz gewechselt werden müssen, sondern einzeln ausgetauscht werden können.

Szenario VI

Szenario VI ist wiederum analog zu Szenario V aufgebaut, mit dem Unterschied, dass hier der teilweise parallele Wechsel von Spulen und Messern betrachtet wird.

9.4.3 Ergebnisse der Simulation

Bei der Verknüpfung der Simulation mit der analytischen Optimierung werden zunächst Vorversuche zur Bestimmung der Größe des Look-aheads durchgeführt. Die Vorversuche werden exemplarisch anhand von Szenario V mit einem kontinuierlichen Spulen- und Messerwechsel durchgeführt. Abbildung 53 zeigt die Mehrkosten in Abhängigkeit der gewählten Größe des Look-aheads. Der Look-ahead mit der Größe 0 entspricht einer reinen Online-Optimierung. Bei der Ausführung der Optimierung werden keine vorausschauenden Informationen verwendet. Im Gegensatz dazu wird für die Online-Optimierung mit Look-ahead anhand des zukünftigen Materialverbrauchs die jeweilige Restkapazität von Spulen und Messern vor jeder Lage berechnet.

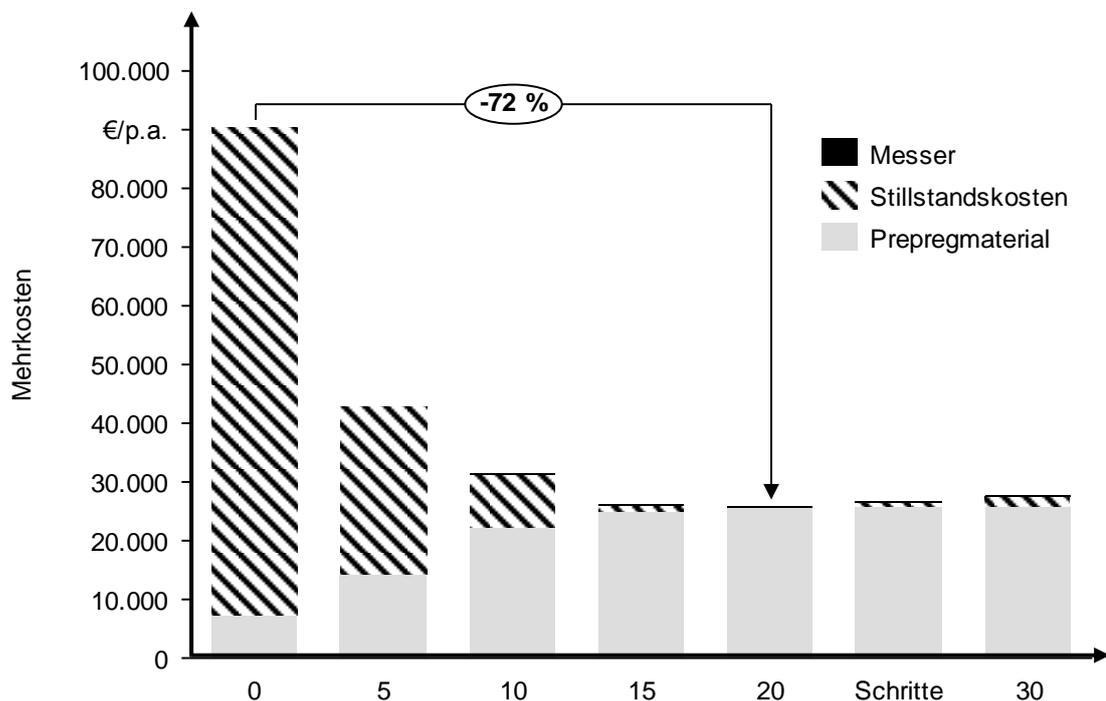


Abbildung 53: Durchschnittliche relative Mehrkosten am Beispiel von Szenario V in Abhängigkeit des gewählten Look-aheads

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

In Abbildung 53 ist zu erkennen, dass der Einsatz einer Optimierung mit Look-ahead gegenüber einer reinen Online-Optimierung zu bevorzugen ist. Minimale Verlustkosten werden mit einer Vorausschau von 20 Lagen erreicht. Dieser Wert wird für die weiteren Untersuchungen im Rahmen der analytischen Optimierung als Größe für den Look-ahead verwendet.

In Tabelle 8 sind die Ergebnisse der unterschiedlichen Szenarien dargestellt. Für die Szenarien wurden die primär den AFP-Prozess betreffenden Kenngrößen wie die *Mehrkosten*, die *Termintreue*, die *Ausbringung* sowie die *mittlere Durchlaufzeit* ermittelt. Ergänzend dazu wurde auch der vorgelagerte Prozess des Auftauens und Lagerns der Spulen betrachtet und hierfür die Kenngrößen *mittlerer Bestand* und *mittlere Liegezeit* analysiert. Dabei zeigt sich, dass die Steuerungsansätze keinen entscheidenden Einfluss auf den vorgelagerten Prozessschritt haben.

Tabelle 8: Ergebnisse für unterschiedliche Szenarien

		Szenario						
		0	I	II	III	IV	V	VI
Mehrkosten	Tsd. €	307	293	282	281	275	276	266
Termintreue	%	84	84,7	85	85,4	85,7	85,3	86,3
Ausbringung	#Teile	357	359	361	362	364	362	366
Mittlere Durchlaufzeit	Std.	17,8	17,3	17,4	16,6	16,7	16,7	16,6
Mittlerer Bestand	#Spulen	7,4	7,3	7,3	7,3	7,3	7,2	7,2
Mittlere Liegezeit Spulen	Std.	47	46	44	44	43	43	42

Die Szenarien können in die drei Gruppen – Ausgangssituation, regelbasierter Ansatz und Optimierung – eingeteilt werden. Das Referenzszenario beschreibt eine reaktive Steuerung. Im Sinne des Anwendungsbeispiels bedeutet das, dass lediglich im Bedarfsfall die Spulen und die Messer getauscht werden. Für diesen Fall sind die Messer- und Prepregmaterialkosten somit minimal. Die resultierenden Kosten für die erforderlichen Stillstände und Anfahrts-/Aufheizphasen sind im Gegenzug jedoch hoch und überwiegen die Materialkosten deutlich.

Szenario I greift basierend auf fixen Regeln in den Produktionsprozess ein. Auf Basis von Erfahrungswissen und mithilfe statischer Berechnungen werden dabei die Grenzwerte für den Spulen- und Messerwechsel festgelegt. Damit kann eine

9.4 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung

Verbesserung der Kosten um 5 % sowie eine Erhöhung der Termintreue um ca. 0,7 % erzielt werden.

Die Szenarien II bis VI stellen Vertreter der ereignisbasierten Mustererkennung in Verbindung mit der Optimierung dar. Dabei zeigt sich, dass durch die Verknüpfung der Maßnahmen aus dem Bereich der Auftragsfreigabe und der Reihenfolgebildung für alle betrachteten Kenngrößen verbesserte Ergebnisse erzielt werden können.

Zum Vergleich der Simulationsergebnisse sind in Abbildung 54 die beiden zentralen Zielgrößen *Mehrkosten* und *Termintreue* für alle Szenarien grafisch gegenübergestellt.

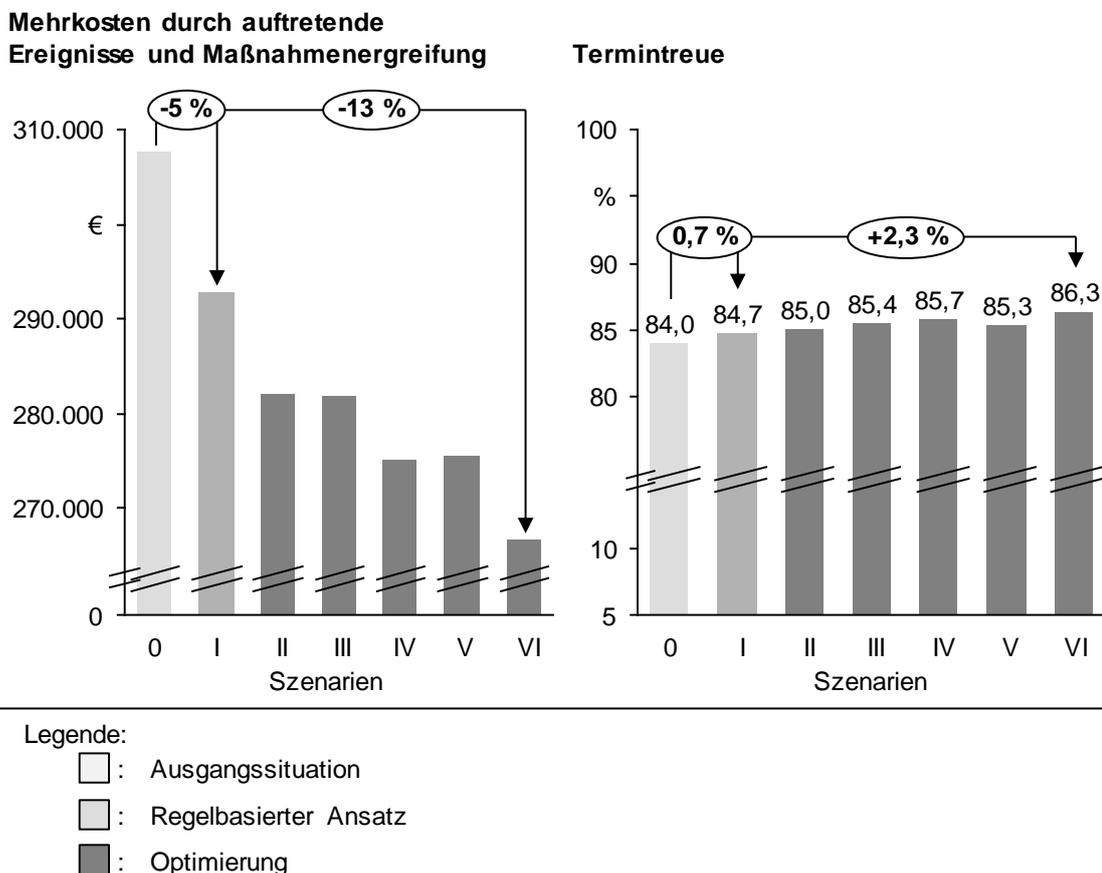


Abbildung 54: Ergebnisse der Simulationsstudie hinsichtlich Mehrkosten (links) und Termintreue (rechts)

Das beste Ergebnis hinsichtlich der Kostenreduzierung und der Erzielung der Termintreue liegt für Szenario VI vor. So können durch die Optimierung des Spulen- und Messerwechsels die Mehrkosten um insgesamt ca. 13 % gesenkt werden und

die Termintreue um 2 % gesteigert werden. Diese Einsparung von 40.844 € wird vor allem durch eine Reduzierung der Anfahrtszeiten sowie Stillstände erzielt. Durch das entwickelte Vorgehen zur Maßnahmenenergreifung kann somit eine deutliche Kostenreduzierung bei gleichzeitiger Erfüllung der Termintreue erreicht werden.

9.5 Technisch-wirtschaftliche Bewertung

9.5.1 Anforderungsbezogene Bewertung

Im Rahmen des vorliegenden Abschnitts wird eine Bewertung des Systems anhand der in Kapitel 4 ausgearbeiteten Anforderungen vorgenommen.

Unabhängig vom Anwendungsfall sind bei der Entwicklung eines Systems sowie einer Methode allgemeine Anforderungen zu beachten, um die praktische Anwendbarkeit sicherzustellen. Im Folgenden soll kritisch beurteilt werden, inwiefern diese Anforderungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit berücksichtigt wurden.

- *Übertragbarkeit und Skalierbarkeit*
Die Zielsetzung für die Entwicklung der Methode sieht einen Einsatz von der ereignisbasierten Produktionssteuerung für verschiedene Branchen vor. Um sicherzustellen, dass der Grad der Allgemeingültigkeit diese Variabilität in der Umsetzung der Methode zulässt, wurde eine generische Modellierung vorgenommen, die auf beliebige Produktionsprozesse anwendbar ist. Eine Anpassung auf spezielle Einsatzmöglichkeiten ist bei der Anwendung der Methode beispielweise durch die gezielte Auslegung des Kennzahlensystems auf das Bezugssystem sowie bei der Maßnahmenauswahl gegeben. Wenngleich die vorliegende Methode für den Einsatz in der Produktion konzipiert wurde, ist ihre Anwendung auch auf andere Bereiche denkbar. So ist einer Anwendung auf Logistikprozesse, z. B. in der Intralogistik, möglich. Die Skalierbarkeit ist durch die Gestaltung der EPA und EPN sichergestellt.
- *Transparenz*
Die Entwicklung einer transparenten Methode gilt als Voraussetzung für die notwendige Übertragbarkeit auf andere Anwendungsbereiche. Erst das

tiefgreifende Verständnis für die einzelnen Entwicklungsschritte und den inneren Zusammenhang der Methode ermöglicht dem Anwender die Adaption der Methode für den angedachten Anwendungsfall. Diese Anforderungen wurden bei der Entwicklung der Methode beachtet und durch das Aufzeigen der Wirkzusammenhänge zwischen den einzelnen Schritten und durch strukturierte Grafiken zur Beschreibung der einzelnen Prozesse erreicht. Die hohe Transparenz sichert zudem die Akzeptanz der Anwender für die vorliegende Methode.

- *Präskriptiver Charakter*

Die Transparenz unterstützt darüber hinaus auch den präskriptiven Charakter der Methode. Die klar beschriebenen Einzelschritte werden plausibel in das übergeordnete Vorgehen eingeordnet und Handlungsempfehlungen innerhalb der Schritte ausgesprochen. Um die Praxistauglichkeit der Methode sicherzustellen, wurde außerdem auf die nötigen Freiheiten geachtet und diese in den Handlungsempfehlungen berücksichtigt.

Aus der übergeordneten Zielsetzung der Arbeit ergeben sich neben den allgemeinen Anforderungen spezielle Anforderungen an die Modellierung der kennzahlenbasierten Datenanalyse. Diese sind in Abschnitt 4.2 beschrieben und im Folgenden bewertet.

- *Reaktionsfähigkeit der Steuerung auf Ereignisse*

Das System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung hat zum Ziel, möglichst unmittelbar auf Ereignisse zu reagieren und negativen Folgen für die Produktion entgegenzuwirken. Um dies zu gewährleisten, müssen die Daten, auf deren Grundlage die Entscheidungen getroffen werden, echtzeitnah vorliegen und verarbeitet werden. Durch die Integration von Sensorik und Erfassungssystemen werden ständig neue Daten erzeugt, sodass aktuelle Informationen bzgl. der Produktion vorliegen. Die empfangenen Daten werden mithilfe der Ereignisverarbeitung aufbereitet, wodurch zeitnah geeignete Reaktionen auf eingetretene Ereignisse ausgelöst werden.

- *Integrationsfähigkeit in bestehende Systemlandschaften*

Die Definition der Referenzarchitektur und die Strukturierung und Modellierung der Ereignisdaten ist in engem Bezug zu bestehenden Normen und Richtlinien erfolgt. Folglich hat das entwickelte Ereignismanagement und die Steuerungsarchitektur einen Referenzcharakter, der sich auf konkrete Softwarelösungen übertragen lässt.

- *Automatisierbarkeit der verwendeten Systemelemente*
Sowohl die Regelableitung als auch die Maßnahmenauswahl und -umsetzung können nicht stets unabhängig von menschlichen Eingriffen erfolgen. Die CEP-Engine hilft, Ereignisströme automatisiert zu verarbeiten. Ebenso wurden für den Bereich der Mustererkennung in Form von Data-Mining-Ansätzen Möglichkeiten aufgezeigt, die die Mitarbeiter unterstützen. Der Grad der Automatisierbarkeit muss anwendungsfallspezifisch und entsprechend der vorliegenden Randbedingungen und Bestimmungen (z. B. gesetzliche Vorschriften) festgelegt werden.
- *Ganzheitliche Erfüllung der logistischen Zielgrößen*
Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt wurde, können durch den Einsatz der ereignisorientierten Produktionssteuerung die Produktionskosten deutlich reduziert werden. Durch die Analyse und Überwachung der aktuellen Produktionssituation kann Ereignissen mit einer „optimalen“ Maßnahme begegnet werden. Durch die Definition eines Kennzahlensystems sowie der anwendungsfallspezifischen Gewichtung der Kennzahlen wird die Erfüllung der logistischen Zielgrößen erreicht. Wie die Validierung zeigt, kann insbesondere die Termintreue, welche die vorrangige Zielgröße vieler Unternehmen darstellt, durch die Verwendung der ereignisbasierten Steuerung eingehalten und verbessert werden. Der Anforderung der ganzheitlichen logistischen Zielerfüllung konnte somit nachgekommen werden.

9.5.2 Wirtschaftliche Bewertung

Neben der Bewertung der Erfüllung der allgemeinen und spezifischen Anforderungen wird im Folgenden auch eine Abschätzung des monetären Nutzens der ereignisbasierten Produktionssteuerung dargelegt. Anhand der wirtschaftlichen Bewertung wird die Effizienz des entwickelten Systems beurteilt. Mithilfe einer statischen Investitionsrechnung wird zu diesem Zweck die Amortisationszeit des Steuerungssystems ermittelt. Es wird die Zeitspanne berechnet, die erforderlich ist, bis das für die Umsetzung aufgewandte Kapital durch Kosteneinsparungen zurückgewonnen wird (POGGENSEE 2015). Die zur Implementierung erforderlichen Investitionskosten teilen sich einerseits in die Sachkosten zur Anschaffung von Standardlösungen und andererseits in die zur Softwareanpassung erforderlichen Personalkosten auf (vgl. Tabelle 9).

*Tabelle 9: Kosten für die Implementierung
der ereignisbasierten Produktionssteuerung*

Einmalige Investitionskosten				
Sachkosten				
Position	Art	Menge	Stückkosten in Euro	Kosten in Euro
S1	Lizenzkosten CEP-Engine	1	25.000,00 €	25.000,00 €
S2	Lizenzkosten Data-Mining	1	10.000,00 €	10.000,00 €
S3	Lizenzkosten Optimierung	1	6.000,00 €	6.000,00 €
Summe Sachkosten				41.000,00 €
Personalkosten				
Position	Art	Personen- tage	Kostensatz pro Tag	Kosten in Euro
P1	Ereignismodell und Schnittstellen	10	1.000,00 €	10.000,00 €
P2	Mustererkennung und Regelableitung	20	1.000,00 €	20.000,00 €
P3	Integration der Methode zur Produktionssteuerung	40	1.000,00 €	40.000,00 €
P4	Schulung Mitarbeiter	5	800,00 €	4.000,00 €
Summe Personalkosten				74.000,00 €
Investitionskosten				115.000,00 €

Da es sich bei der entwickelten ereignisbasierten Produktionssteuerung primär um ein Softwaresystem handelt, fallen Investitionen für Hardware nur an, falls zusätzliche Sensorik als Ereignisquelle benötigt wird, um relevante Kennzahlen analysieren zu können. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel wurden Ereignisse analysiert, die durch die in der Anlage verbaute Sensorik erzeugt werden. Sachkosten fallen in Form von Lizenzkosten für die CEP-Engine (S1), die Data-Mining-Software (S2) sowie den Optimierungssolver (S3) an.

Auf Basis von vergleichbaren Projekten werden die Aufwände für die erforderlichen Anpassungen und für die Implementierung der Softwarefunktionen in Form von Personentagen quantifiziert. Es entstehen Kosten für die Ereignismodellierung

9 Prototypische Umsetzung und Validierung

und die Definition der erforderlichen Schnittstellen (P1), ebenso verursachen die Mustererkennung und die Regelableitung (P2) Aufwände durch die Einbindung des Expertenwissens. Darüber hinaus bedarf es der Umsetzung der Elemente der Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung (P3). Zudem müssen intern Schulungen der Mitarbeiter (P4) durchgeführt werden. Für einen Softwareentwickler wird ein marktüblicher Tagessatz von 1.000 € angenommen. Die Schulungen werden nicht von Softwarespezialisten durchgeführt und daher mit einem reduzierten Tagessatz von 800 € verrechnet. Für die Abschätzung der Investitionskosten bestehend aus Sach- und Personalkosten ergibt sich eine Summe von 115.000 €. Zusätzlich werden die laufenden Betriebskosten betrachtet, die jährlich für die Wartung und Pflege des Softwaresystems zu entrichten sind. Die Betriebskosten werden basierend auf gängigen Vertragsmodellen als Prozentsatz der Lizenzkosten definiert. In diesem Fall werden die jährlichen Wartungskosten in Höhe von 10 % des Auftragswerts angenommen. Die Lizenzkosten belaufen sich insgesamt auf 41.000 €, dementsprechend liegen die Betriebskosten bei 4.100 € pro Jahr (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Laufende jährliche Betriebskosten

Laufende jährliche Betriebskosten				
Sachkosten				
Position	Art	Menge	Stückkosten in Euro	Kosten in Euro
B1	Wartung und Pflege des Systems	1	4.100,00 €	4.100,00 €
Summe Betriebskosten				4.100,00 €

Die Amortisationszeit des Steuerungssystems berechnet sich aus dem Quotienten der Investitionskosten und der jährlichen Netto-Einsparung, d. h. der Einsparung abzüglich der jährlichen Betriebskosten. Auf Basis der Simulationsergebnisse in Abschnitt 9.4.3 erfolgt die Abschätzung der jährlichen Einsparung von 40.844 €. Für die Amortisationsdauer gelten nach (VOEGELE & SOMMER 2012) die Formeln (26) und (27):

$$\begin{aligned}
 t_{\text{Amortisation}} &= \frac{\text{Investitionskosten (€)}}{\text{durchschn. jährlicher Nutzen } \left(\frac{\text{€}}{\text{Jahr}}\right)} & (26) \\
 &= \frac{115.000 \text{ €}}{36.744 \text{ € pro Jahr}} = 3,13 \text{ Jahre}
 \end{aligned}$$

$$\text{mit Nutzen} = \text{Einsparung} - \text{laufende Betriebskosten} \quad (27)$$

$$= 40.844 \text{ €} - 4.100 \text{ €} = 36.744 \text{ €}$$

Laut BMF (2005) wird die Nutzungsdauer zur Einführung eines betrieblichen Softwaresystems wie der ERP-Software mit fünf Jahren angegeben. Basierend darauf wird diese Dauer auch als Amortisationszeit für die Einführung der ereignisbasierten Software angesetzt. Da die berechnete Amortisationszeit von 3,13 Jahren die durchschnittliche Nutzungsdauer nicht übersteigt, ist für dieses Umsetzungsbeispiel eine Amortisation des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung innerhalb eines akzeptablen Zeitraums möglich. Zudem gilt es zu berücksichtigen, dass der Nutzen der ereignisbasierten Steuerung nur für eine AFP-Anlage aufgezeigt wurde. Bei der Anwendung des Systems auf weitere Anlagen sind Synergieeffekte zu erwarten.

Zur Verallgemeinerung der Erkenntnisse aus der exemplarisch durchgeführten Amortisationsrechnung wird in Anlehnung an VOGL (2009) eine Grenzwertbetrachtung durchgeführt (vgl. Abbildung 55). Für die auf der Grenzkurve liegenden Wertepaare gilt dabei, dass der mittels des Systems erzielbare Nutzen gleich der Höhe der jährlichen Gesamtkosten entspricht. Für Wertepaare, die über dieser Grenzkurve liegen ergibt sich ein positiver monetärer Nutzeneffekt.

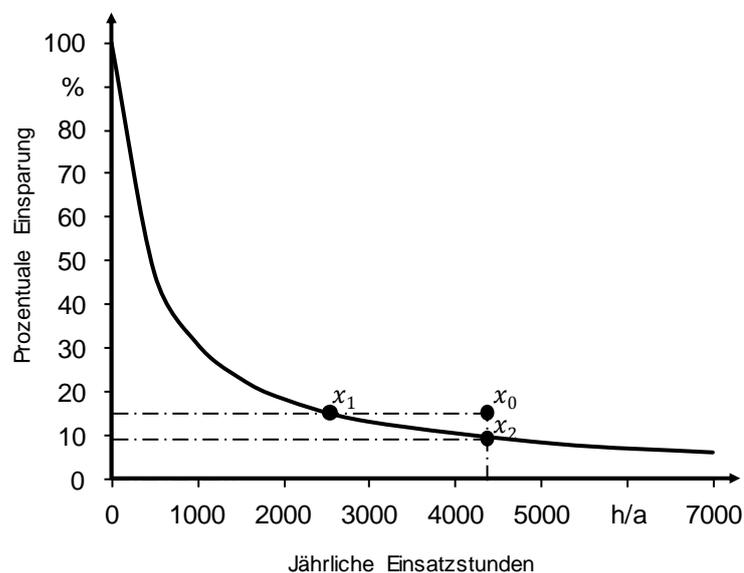


Abbildung 55: Wirtschaftlichkeitsgrenze des entwickelten Systems

Das oben dargestellte Anwendungsbeispiel (x_0) liegt oberhalb der Grenzkurve und kann somit positiv bewertet werden. Dem Anwendungsbeispiel liegt die simulativ

ermittelte Reduzierung der Kosten von 13 % im Vergleich zum Ausgangsszenario (vgl. Abbildung 54) bei einer jährlichen Nutzungsdauer der Anlage von 5.160 Stunden zu Grunde. Der Hauptanteil der jährlichen Einsparung wird aufgrund der ereignisbasierten und echtzeitnahen Steuerung durch die Reduzierung der Stillstandszeiten der Anlage bezogen auf die jährliche Nutzungsdauer erzielt. Dabei ergibt sich für die Betrachtung der Grenzwerte, dass bei einer jährlichen Nutzungsdauer von 5.160 Stunden bereits ab einer Effizienzsteigerung von 8 % ein wirtschaftlicher Einsatz der Methodik möglich ist (x_2). Umgekehrt gilt, dass für eine angenommene Einsparung von 13 % sich das System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung schon bei einem jährlichen Einsatz von 2.980 Stunden amortisiert (x_1).

9.6 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurden die Anwendung des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung sowie die simulationsbasierte Umsetzung und Validierung anhand eines realen Anwendungsbeispiels dargestellt. Im Speziellen wurde anhand der Durchführung unterschiedlicher Simulationsszenarien der Nutzen des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung quantifiziert. Grundsätzlich können mit dem Steuerungssystem die Herstellkosten bei einer gleichzeitigen Steigerung der Termintreue reduziert werden. Auf Basis dieser Erkenntnisse konnte eine erfolgreiche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung durchgeführt werden.

10 Zusammenfassung und Ausblick

10.1 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund neuer Technologien zur Datenerzeugung und -verarbeitung im Bereich der Produktion bieten sich für Unternehmen neue Chancen, diese einzusetzen, um stets aktuelle Informationen über die Abläufe in der Produktion zu erhalten. Gleichzeitig erfordern die aktuellen Randbedingungen des Marktes zunehmend mehr Flexibilität und Agilität von Unternehmen und somit eine zeitgemäße Produktionssteuerung. Es besteht der Bedarf nach einer effizienten Entscheidungsunterstützung auf Basis von Rückmeldedaten in der Produktion. Zwar existieren verschiedene Forschungsansätze für eine situationsbezogene Produktionssteuerung, jedoch besteht keine durchgängige Methode zur Realisierung einer ereignisbasierten Produktionssteuerung. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung entwickelt, um eine effiziente Entscheidungsunterstützung auf Basis der echtzeitnahen Verarbeitung produktionsrelevanter Ereignisse zu bieten.

Basierend auf der Motivation und Ausgangssituation wurden die relevanten Grundlagen sowie der Stand der Technik und Forschung aufgezeigt. Insbesondere wurden hierbei Ansätze zur Ereignismodellierung, zum Ereignismanagement und zur Steuerung von Produktionsabläufen betrachtet. Anschließend erfolgten die Ableitung des resultierenden Handlungsbedarfs sowie die Definition der Anforderungen an eine ereignisbasierte Produktionssteuerung. Auf dieser Grundlage wurde das System zur ereignisorientierten Produktionssteuerung entwickelt. Das System umfasst drei zentrale Säulen: *die Ereignismodellierung, die Ereignisverarbeitung und -analyse* sowie *die Methode zur ereignisorientierten Produktionssteuerung*.

Die Ereignismodellierung besteht aus drei Bereichen. So wurde für die Strukturierung der Ereignisdaten eine Erweiterung des EPCIS-Standards ausgewählt. Um die verwendeten Ereignistypen zu beschreiben, wurde ein strukturelles Ereignismodell für die Produktionssteuerung in Form eines UML-Klassendiagramms entworfen. Für die Modellierung der Produktionsprozesse und der Ereignisregeln wurde ein zweistufiges Vorgehen entwickelt. Die Abläufe und logischen Zusammenhänge werden mittels einer angepassten EPK-Notation modelliert. In Ergänzung dazu ist das Wissen bezüglich der Zusammenhänge und Beschränkungen für

die jeweilige Abfolge von Ereignissen festzuhalten, um die relevanten Ereignisregeln visualisieren und dokumentieren zu können.

Für die Gestaltung der Ereignisverarbeitung und -analyse wurde ein Referenzmodell für die zugrundeliegende Steuerungsarchitektur entwickelt. Die Ereignisverarbeitung basiert auf der Erkennung von Mustern in den Ereignisströmen. Das entwickelte Modellierungsvorgehen ist dabei Grundlage für die strukturierte Durchführung der expertenbasierten Mustererkennung. In diesem Zusammenhang wurde vertieft auf die für die Produktionssteuerung relevanten Wissensarten eingegangen. Daneben wurde aufgezeigt, dass zur Erkennung unbekannter Muster in den Produktionsdaten Algorithmen aus dem Bereich der Assoziationsanalyse zu einer Unterstützung der Experten dienen können. Zur Datenanalyse historischer Daten steht eine Vielzahl unterschiedlicher Algorithmen zur Verfügung. Für die vorliegende Arbeit wurde der Fokus auf die Erkennung von unbekanntem Mustern in den Datensätzen gelegt und somit das unüberwachte Lernen fokussiert. Mit dem FP-Growth Algorithmus und dem GSP-Algorithmus wurden zwei etablierte Algorithmen aus dem Bereich der Assoziationsanalyse ausgewählt, die für die Analyse der historischen Daten zum Einsatz kommen, um neue Erkenntnisse zu gewinnen. Als Ausgangspunkt für die Initiierung von Maßnahmen wurden zudem Kennzahlen-templates entwickelt, um die Definition von Eingriffsgrenzen übersichtlich zu dokumentieren.

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelte Methode bildet das zentrale Element des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung und besteht aus der Initiierung, der Generierung sowie der Auswahl und Priorisierung von Maßnahmen zur Entscheidungsunterstützung. Als Basis für die Gestaltung der Maßnahmeninitiierung wurden die Ereignisse hinsichtlich ihres Auftretens und ihrer Auswirkungen klassifiziert, ebenso wurde die Berechnung des zu erwartenden Schadenswerts zur Bewertung der Auswirkungen von Ereignissen aufgezeigt. Im Hinblick auf die Maßnahmengenerierung kann zwischen der Ereignisverarbeitung und der Ereignisbehandlung unterschieden werden. Hierbei wurde insbesondere die Definition von Maßnahmen für die Ereignisbehandlung fokussiert, da diese sich für den Einsatz im Rahmen der Produktionssteuerung eignet. Es wurde ein Maßnahmenportfolio definiert, das sich in die Bereiche Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung gliedert.

Für die Priorisierung der Maßnahmen wurde exemplarisch ein auf den logistischen Zielgrößen basierendes Kennzahlensystem entworfen. Dieses kann unternehmensspezifisch erweitert und gewichtet werden. Um eine Vorselektion für die Maßnahmenauswahl vornehmen zu können, wurde eine Ursache-Wirkungs-Matrix eingesetzt. Zentrale Zielgrößen stellen z. B. die Termintreue und die Kosten dar, die durch die Auswirkungen der Ereignisse entstehen. Basierend auf Informationen bzgl. der Auswirkungen der Ereignisse sowie der Maßnahmen konnte eine Zielfunktion definiert werden. Als Ansatz für die Lösung der sich ergebenden Zielfunktion wurde eine Online-Optimierung mit Look-ahead gewählt. Auf Basis der Ergebnisse der Optimierung konnten Entscheidungen für die Maßnahmenauswahl abgeleitet werden und somit eine echtzeitnahe, ereignisbasierte Entscheidungsunterstützung realisiert werden.

Die Anwendung des Systems an einem realen Anwendungsfall hat gezeigt, dass der industrielle Einsatz des Systems zur ereignisbasierten Produktionssteuerung möglich ist. Anhand der Ergebnisse der simulationsgestützten Validierung konnte gezeigt werden, dass die ereignisbasierte Auswahl von Maßnahmen einen Nutzen bietet. Als Vergleichsansatz diente die aktuelle regelbasierte Steuerung des Produktionsprozesses. Abschließend wurde dargestellt, dass das System die aufgestellten Anforderungen erfüllt und zudem wirtschaftlich ist.

10.2 Ausblick

Im Hinblick auf den Markt der CEP-Engines ist zukünftig davon auszugehen, dass weniger isolierte Softwarelösungen auf dem Markt angeboten und ereignisorientierte Ansätze stattdessen zunehmend in fachlich umfangreichen Softwaresuiten integriert sein werden. So bieten namenhafte Hersteller beispielsweise ereignisorientierte Technologien im Rahmen ihrer Cloud- und Big Data-Lösungen an. Dadurch wird zwar eine technologische Verbreitung der Ereignisorientierung herbeigeführt, dennoch besteht weiterhin die Aufgabe, Mitarbeiter im Umgang mit ereignisorientierten Technologien zu schulen und somit ein Verständnis hinsichtlich der Potenziale und Einsatzmöglichkeiten zu schaffen. Eine weitere Herausforderung für den Einsatz der Ereignisverarbeitung ist die fehlende Standardisierung der Ereignismodellierung und von Ereignisverarbeitungssprachen. Eine Standardisierung würde die Definition und Formulierung von Ereignisregeln deutlich vereinfachen.

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der ereignisbasierten Auswahl und Priorisierung von Maßnahmen zur Verbesserung der Produktionssteuerung. Aufbauend auf dieser Arbeit ließe sich auch ein Einsatz des CEP-Systems im Störungsmanagement und im Bereich der Predictive Maintenance prüfen. Dabei läge der Schwerpunkt auf der Erkennung von Gründen für Störungen im Prozess, wozu es das Thema Information Retrieval näher zu untersuchen gilt. Partikelschwarmoptimierungen sind ein zielführender Ansatz zur Ermittlung von Ursachen für Störungen, den es weiter zu verfolgen gilt. Insbesondere die Verbindung von Ansätzen der Assoziationsanalyse mit Ansätzen der multikriteriellen Optimierung und evolutionären Algorithmen ist ein vielversprechender Ausgangspunkt, um korrekte Muster automatisiert abzuleiten. Somit können die produktionsrelevanten Daten umfassend analysiert und für die Produktionssteuerung verfügbar gemacht werden.

11 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 978-3-446-42595-8.

ADI ET AL. 2006

Adi, A.; Botzer, D.; Nechushtai, G.; Sharon, G.: Complex event processing for financial services. In: Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) (Hrsg.): Services Computing Workshops, 2006. SCW '06. IEEE 2006, S. 7-12. ISBN: 0-7695-2681-0.

AGRAWAL ET AL. 1993

Agrawal, R.; Imielinski, T.; Swami, A.: Mining Association Rules between Sets of Items in Large Databases. In: Proceedings of the ACM SIGMOD international conference on Management of data. Washington DC, USA, S. 207-216.

AGRAWAL & SRIKANT 1994

Agrawal, R.; Srikant, R.: Fast Algorithms for Mining Association Rules. In: Proceedings of the 20th VLDB Conference. Santiago, Chile, S. 1-32.

ALISCH ET AL. 2004

Alisch, K.; Arentzen U.; Winter E.: Gabler Wirtschaftslexikon. 16. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag 2004, S. 2400-2402. ISBN 978-3-663-01440-9.

ALPAR & NIEDEREICHHOLZ 2000

Alpar, P.; Niedereichholz, J.: Data-Mining im praktischen Einsatz: Verfahren und Anwendungsfälle für Marketing, Vertrieb, Controlling und Kundenunterstützung. 1. Aufl. Braunschweig/Wiesbaden: Vieweg 2000. ISBN: 978-3-528-05748-0.

ANSORGE 2007

Ansorge D.: Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen Dissertation. Technische Universität München: Utz 2007. ISBN: 978-3-8316-0785-3. (Forschungsberichte *iwb*, 214).

ARNOLD 2008

Arnold, D.: Handbuch Logistik. 3. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-72928-0.

ARNOLD & FURMANS 2009

Arnold, D.; Furmans, K.: Materialfluss in Logistiksystemen. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag 2009. ISBN: 978-3-642-01404-8.

BACK 2002

Back, A.: Entscheidungsunterstützungssysteme. In: Küpper, H.-U.; Wagenhofer, A. (Hrsg.): Handwörterbuch Unternehmensrechnung und -controlling. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2002, S. 370-374. ISBN: 3-7910-8048-2.

BARROS ET AL. 2007

Barros, A.; Decker, G.; Grosskopf, A.: Complex Events in Business Processes. In: Abramowicz, W. (Hrsg.): Business Information Systems. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2007, S. 29-40. ISBN: 978-3-540-72035-5.

BECKER & DELFMANN 2004

Becker, J. (Hrsg.); Delfmann, P.: Referenzmodellierung – Grundlagen, Techniken und domänenbezogene Anwendung. Heidelberg: Physica 2004.

BEIERLE & KERN-ISBERNER G. 2003

Beierle, C.; Kern-Isberner, G.: Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen – Algorithmen – Anwendungen. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2003. ISBN: 978-3-663-05681-2.

BERGER ET AL. 2015

Berger, U.; Creutzmacher, T.; Lepratti, R.; Lamparter, S.: Flexible Produktionssysteme in der Praxis. *Industrie 4.0 Management* 31 (2015) 6, S. 24-27.

BERGER ET AL. 2017

Berger, C.; Pielmeier, J.; Reinhardt, G.: Ereignisbasierte Produktionsplanung und -steuerung. *wt online* 107 (2017) 3, S. 143-147.

BERLAK 2003

Berlak, J.: Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen. Dissertation Technische Universität München: Utz 2003. ISBN: 3-8316-0258-1. (Forschungsberichte *iwb*, 181).

BERNARD 2011

Bernard, T.: Entscheidungsunterstützung durch Data-Mining-Werkzeugen. *SPS-Magazin* Band 5 (2011), S. 608-610.

BLOCK ET AL. 2017

Block, C.; Kuhlenkötter, B.; Frank, T.; Burgers, U.: Online-Materialflusssimulationen zur Entscheidungsunterstützung in der PPS – Ein agentenbasierter Ansatz zur Vernetzung vorhandener IT-Systeme zum autonomen Datenaustausch. *productivity* 22 (2017), S. 28-30.

BLUTNER ET AL. 2009

Blutner, D.; Cramer, S.; Krause, S.; Mönks, T.; Nagel, L.; Reinholz, Andreas; Witthaut, Markus: Assistenzsysteme für die Entscheidungsunterstützung. In: Buchholz, P.; Clausen, U. (Hrsg.): Große Netze der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2009, S. 241-270. ISBN: 978-3-540-71047-9.

BMF 2005

BMF: Bilanzsteuerrechtliche Beurteilung von Aufwendungen zur Einführung eines betriebswirtschaftlichen Softwaresystems (ERP-Software). Berlin, 2005. https://www.hk24.de/blob/hhik24/produktmarken/beratung-service/recht_und_steuern/steuerrecht/downloads/1158044/b65818aeb482157e7f3cf7350f19dff9/2005_NOV_18-_AFA_Software_137-property-publicationFile-data.pdf – Zuletzt aufgerufen am 20.03.2018.

BOBEK ET AL. 2007

Bobek, A.; Zeeb, E.; Gولاتowski, F.; Timmermann, D.: Entwicklung standardisierter Geräte mittels Geräte- und Dienstvorlagen für das Devices Profile for Web Services. In: Damaschke, N. (Hrsg.): 12. Symposium Maritime Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik. Rostock 2007, S. 185-190.

BRACKEL 2009

Brackel, T. v.: Adaptive Steuerung flexibler Werkstattfertigungssysteme: Nutzung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien zur effizienten Produktionssteuerung unter Echtzeitbedingungen: Zugleich Dissertation Universität Paderborn, 2008. Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre. Wiesbaden: Gabler 2009.

BRAMBRING 2017

Brambring, F.: Steigerung der Datenintegrität in der Produktionssteuerung, Dissertation RWTH Aachen: Apprimus 2017. ISBN: 978-3863595371.

BRECHER 2011

Brecher, C.: Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011.

BRÜGGEMANN 2010

Brüggemann, D.: Ein parametrisierbares Verfahren zur Änderungsplanung für den Flexible Flow Shop mit integrierter Schichtmodellauswahl. Dissertation, Universität Paderborn, Paderborn, 2010.

BRUNS & DUNKEL 2010

Bruns, R.; Dunkel, J.: Event-driven architecture: Softwarearchitektur für ereignisgesteuerte Geschäftsprozesse. Berlin, Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-02438-2.

CAMERON ET AL. 2012

Cameron, M. A.; Power R.; Robinson B.; Yin J.: Proceedings of the 21st international conference companion on World Wide Web, 21st World Wide Web Conference 2012; ACM Special Interest Group on Hypertext, Hypermedia, and Web. New York, NY: ACM 2012.

CHAMONI 2006

Chamoni, P.: Analytische Informationssysteme: Business Intelligence-Technologien und -Anwendungen. Wiesbaden: Springer-Verlag 2006. ISBN: 3-540-29286-1.

CLEVE & LÄMMEL 2014

Cleve, J.; Lämmel U.: Data-Mining. München: De Gruyter Oldenbourg. 2014. ISBN: 978-3-486-71391-6.

CLEVE & LÄMMEL 2016

Cleve, J.; Lämmel U.: Data-Mining. München: De Gruyter Oldenbourg. 2016. ISBN: 978-3-110-45675-2.

CUPEK ET AL. 2016

Cupek, R.; Ziebinski, A.; Huczala, L.; Erdogan, H.: Agent-based manufacturing execution systems for short-series production scheduling. Computers in Industry 82 (2016), S. 245-258.

DAGSTUHL PARTICIPANTS 2011

Dagstuhl Participants: The event processing manifesto. <http://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2011/2985/pdf/10201.SWM.2985.pdf>. Zuletzt aufgerufen am 24.01.2018.

DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, W.: Theorie der Produktionsplanung und -steuerung: Im Sommer keine Kirschpralinen? Dordrecht, New York: Springer 2009. ISBN: 978-3-642-00632-6.

DIN 44300

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN 44300: Informationsverarbeitung – Begriffe. Berlin: Beuth 1972.

DIN 44300-1

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V. DIN 44300-1: Informationsverarbeitung – Begriffe – Allgemeine Begriffe: Beuth 1988-11.

DIN 66001

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 66001: Informationsverarbeitung: Sinnbilder und ihre Anwendung. Berlin: Beuth 1983.

DIN SPEC 91329

Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN SPEC 91329: Erweiterung des EPCIS-Ereignismodells um aggregierte Produktionsereignisse zur Verwendung in betrieblichen Informationssystemen, Berlin: Beuth Verlag 2016.

DICKMANN 2015

Dickmann, P.: Schlanker Materialfluss: Mit Lean Production, Kanban und Innovationen. 3. Aufl. Berlin: Springer Vieweg 2015. ISBN: 978-3-662-44868-7.

DUDEK ET AL. 2002

Dudek, G.; Rohde, J. Sürle, C.: Advanced Planning Systems – Lösungsverfahren und Modellierung. *Industrie Management* 18 (2002) 6, S. 49-52.

DUNKE ET AL. 2014

Dunke, F.; Necil, J.; Nickel, S.: Online-Optimierung und Simulation in der Logistik. In: Lübbecke, M.; Weiler, A.; Werners, B. (Hrsg.): *Zukunftsperspektiven des Operations Research: Erfolgreicher Einsatz und Potenziale*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, S. 33-47. ISBN: 978-3-658-05707-7.

DUNKE & NICKEL 2013

Dunke, F.; Nickel, S.: Simulative Algorithm Analysis in Online Optimization with Look-ahead. In: Dangelmaier, W.; Laroque, C.; Klaas, A. (Hrsg.): *Simulation in Produktion und Logistik 2013*. Paderborn, 09. - 11. Oktober 2013. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Inst. Univ. Paderborn 2013, S. 405-416. ISBN: 978-3-942647-35-9. (ASIM-Mitteilung, 147).

DUNKE & NICKEL 2016

Dunke, F.; Nickel, S.: A general modeling approach to online optimization with Look-ahead. *Omega* 63 (2016), S. 134-153.

DUNKEL ET AL. 2008

Dunkel, J.; Eberhart, A.; Fischer, S.; Kleiner, C.; Koschel, A.: *Systemarchitekturen für Verteilte Anwendungen: Client-Server, Multi-Tier, SOA, Event*

Driven Architectures, P2P, Grid, Web 2.0. 1. Aufl. München: Hanser, Carl 2008. ISBN: 978-3-446-41321-4.

DUNKEL ET AL. 2009

Dunkel, J.; Fernandez, A.; Ortiz, R.: Injecting Semantics into Event-Driven Architectures. In: Filipe, J. (Hrsg.): Enterprise information systems. 11th International Conference, ICEIS 2009, Milan, Italy, May 6 - 10, 2009, proceedings. Berlin, Heidelberg, New York, NY: Springer 2009, S. 70-75. ISBN: 978-3-642-01346-1.

ECKERT & BRY 2009

Eckert, M.; Bry, F.: Complex Event Processing (CEP). (Hrsg.): Aktuelles Schlagwort. In: Informatik Spektrum 32 (2), S. 163-167. DOI: 10.1007/s00287-009-0329-6. München: Springer 2009.

ELMARAGHY ET AL. 2012

ElMaraghy, W.; ElMaraghy, H.; Tomiyama, T.; Monostori, L.: Complexity in engineering design and manufacturing. CIRP Annals – Manufacturing Technology 61 (2012) 2, S.793-814.

ENGELHARDT 2015

Engelhardt, P. R.: System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Dissertation Technische Universität München. München: Utz 2015. ISBN: 978-3-8316-4472-8. (Forschungsberichte *iwb* 299).

ESTER & SANDER 2000

Ester, M.; Sander, J.: Knowledge Discovery in Databases: Techniken und Anwendungen. Berlin: Springer 2000. ISBN: 978-3-540-67328-6.

ETZION & NIBLETT 2010

Etzion, O.; Niblett, P.: Event processing in action. Greenwich [Conn.]: Manning 2011. ISBN: 1-935-18221-8.

EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3: Arbeitsvorbereitung. 4. Aufl. ISBN: 978-3-642-56336-2. Berlin: Springer 2002.

FAYYAD ET AL. 1996A

Fayyad, U.; Piatetsky-Shapiro, G.; Smyth, P.: Knowledge Discovery and Data-Mining: Towards a Unifying Framework. In: Simoudis, E. ET AL. (Hrsg.): Proceedings / Second International Conference on Knowledge Discovery & Data-Mining. Menlo Park, Calif.: AAAI Press 1996. ISBN: 978-1-577-35004-0.

FAYYAD ET AL. 1996B

Fayyad, U.; Piatetsky-Shapiro, G.; Smyth, P.: From Data-Mining to Knowledge Discovery in Databases. AI Magazine 17 (1996) 3, S. 37-54.

FELDHORST & LIBERT 2010

Feldhorst, S.; Libert, S.: Software-Methoden für die Automatisierung. In: Günthner, W. A.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. Berlin: Springer 2010, S. 29-40. ISBN: 978-3-642-04895-1.

FELDMANN & REINHART 2000

Feldmann, K.; Reinhart, G.: Simulationsbasierte Planungssysteme für Organisation und Produktion: Modellaufbau, Simulationsexperimente, Einsatzbeispiele. Berlin: Springer 2000. ISBN: 978-3-662-42587-9.

FELSBERGER ET AL. 2016

Felsberger, A.; Oberegg B.; Reiner G.: A Review of Decision Support Systems for Manufacturing Systems. Graz, 2016. - 26.01.2018.

FESTO LERNZENTRUM 2018

Festo Lernzentrum Saar GmbH: SOPHIE - Synchrone Produktion durch teilautonome Planung und humanzentrierte Entscheidungsunterstützung. <http://sophie.festo-lernzentrum.de/>. Zuletzt aufgerufen am 23.01.2018.

FINKENZELLER 2008

Finkenzeller K.: RFID Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. 5 Aufl. München: Hanser 2008. ISBN: 978-3-446-41200-2.

FLEMMING ET AL. 1999

Flemming, M.; Ziegmann, G.; Roth, S.: Faserverbundbauweisen: Fertigungsverfahren mit duroplastischer Matrix. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; Imprint; Springer 1999. ISBN: 978-3-642-58371-1.

FOURNIER-VIGER ET AL. 2017

Fournier-Viger, P.; Lin, J. C.-W.; Kiran, R. U.; Koh, Y. S.; Thomas, R.: Survey of Sequential Pattern Mining. Data Science and Pattern Recognition 1 (2017) 1, S. 54-77.

FREUND & RÜCKER 2014

Freund, J.; Rücker, B.: Praxishandbuch BPMN 2.0: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG 2014. ISBN: 344-644-292-8.

FUCHS 2013

Fuchs, S.: Wertstromorientierte Auftragsfreigabe bei dynamischen Engpässen in der Produktion nach dem Werkstattprinzip. 1. Aufl. Aachen: Apprimus-Verl. 2013. ISBN: 978-3-863-59145-8. (Edition Wissenschaft Apprimus, 16/2013).

FÜRNKRANZ ET AL. 2012

Fürnkranz, J.; Gamberger, D.; Lavrač, N.: Foundations of Rule Learning. Heidelberg: Springer 2012. ISBN: 978-3-540-75196-0. (Cognitive Technologies).

GABRIEL & JANIESCH 2016

Gabriel, S.; Janiesch, C.: Konzeptionelle Modellierung ausführbarer Event Processing Networks für das Event-driven Business Process Management; Modellierung 2016: Lecture Notes in Informatics (LNI), Gesellschaft für Informatik, Bonn 2016; S. 173-180

GARCÍA-DOMÍNGUEZ ET AL. 2013

García-Domínguez, A.; Marcos-Bárcena, M.; Medina-Bulo, I.; Prades-Martell, L.: Towards an Integrated SOA-based Architecture for Interoperable and Responsive Manufacturing Systems. *Procedia Engineering* 63 (2013), S. 123-132.

GARTNER 2017

Gartner IT Glossary. <https://www.gartner.com/it-glossary/real-time-analytics>. Zuletzt aufgerufen am: 28.11.2017.

GASS & FU 2016

Gass, S., I.; Fu, M. C.: Encyclopedia of operations research and management science. [Enhanced Credo edition] Aufl. New York, New York, Boston, Massachusetts: Springer Berlin Heidelberg; Credo Reference 2016. ISBN: 978-1-4419-1137-7.

GEIGER 2015

Geiger, F.: System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten. München: Utz 2015. ISBN: 978-3-8316-4537-4. (Forschungsberichte *iwb* 311).

GIRET ET AL. 2017

Giret, A.; Trentesaux, D.; Salido, M. A.; Garcia, E.; Adam, E.: A holonic multi-agent methodology to design sustainable intelligent manufacturing control systems. *Journal of Cleaner Production* 167 (2017), S. 1370–1386.

GIRET & BOTTI 2004

Giret, A.; Botti, V.: Holons and agents. *Journal of Intelligent Manufacturing* 15 (2004) 5, S. 645–659.

GLADEN 2011

Gladen, W.: *Performance Measurement: Controlling mit Kennzahlen*. 5., überarbeitete Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag / Springer Fachmedien 2011. ISBN: 978-3-8349-3059-0.

GORECKY ET AL. 2017

Gorecky, D.; Hennecke A., Schmitt M., Weyer S., Zühlke D.: Wandelbare modulare Automatisierungssysteme. In: Reinhart, G. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik*. München: Hanser 2017, S. 555–603. ISBN: 978-3-446-44642-7.

GOTTSCHALK 2005

Gottschalk, L. L.: *Flexibilitätsprofile: Analyse und Konfiguration von Strategien zur Kapazitätsanpassung in der industriellen Produktion*. Dissertation ETH Zürich. Zürich: Eigenverlag 2005.

GRUNDSTEIN ET AL. 2015

Grundstein, S.; Schukraft, S.; Freitag, M.; Scholz-Reiter, B.: Planorientierte autonome Fertigungssteuerung: Simulationsbasierte Untersuchung der Planeinhaltung und der logistischen Zielerreichung. *wt Werkstattstechnik online* 105 (2015) 4, S. 220-224.

GS1-STANDARD 2007

GS1 EPC Information Services (EPCIS) Version 1.0.1 Specification. Brüssel, Belgien: GS1 AISBL 2007.

GS1-STANDARD 2012

GS1 EPC Information Services EPC/Rfid - Die Zukunft hat begonnen. https://www.gs1-germany.de/fileadmin/gsl/basis_informationen/epc_rfid_die_zukunft_hat_begonnen.pdf. Zuletzt aufgerufen am 15.12.2017

GÜNTHNER ET AL. 2010

Günthner, W. A.; Chisu, R., Kuzmany, F.: Die Vision vom Internet der Dinge. In: Günthner, W. A.; ten Hompel, M. (Hrsg.): *Internet der Dinge in der Intra-logistik*. Berlin: Springer 2010. S. 43-46. ISBN: 978-3-642-04895-1.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: *Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis*. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI 1989. ISBN: 3-18-400924-6.

HAMANN 2008

Hamann, T.: Lernfähige intelligente Produktionsregelung. Berlin: GITO-Verl. 2008. ISBN: 978-394-001933-2. (Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik, 7).

HAN ET AL. 2000

Han, J.; Pei, J.; Yin, Y. (2000) Mining Frequent Patterns without Candidate Generation. In: Proceedings of the 2000 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data (SIGMOD '00). Dallas, Texas, USA, S. 1-12.

HARJUNKOSKI ET AL. 2014

Harjunkoski, I.; Maravelias, C. T.; Bongers, P.; Castro, P. M.; Engell, S.; Grossmann, I. E.; Hooker, J.; Méndez, C.; Sand, G.; Wassick, J.: Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods. Computers & Chemical Engineering 62 (2014), S. 161-193.

HEDTSTÜCK 2017

Hedtstück, U.: Complex Event Processing: Verarbeitung von Ereignismustern in Datenströmen. 1. Aufl. 2017 Aufl. Berlin: Springer Berlin; Springer Vieweg 2017. ISBN: 978-3-662-53450-2.

HERAGUEMI ET AL. 2015

Heraguemi, K. E.; Kamel, N.; Drias, H.: Association Rule Mining Based on Bat Algorithm. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience 12 (2015) 7, S. 1195–1200.

HILTY 2012

Hilty, L. M.: Lokalisiert und identifiziert: Wie Ortungstechnologien unser Leben verändern. Zürich: vdf 2012. ISBN: 978-3-7281-3460-8. (TA-Swiss, 57).

HOPP & SPEARMAN 2008

Hopp, W. J.; Spearman M. L.: Factory Physics (International Edition). 3. Aufl. New York: McGraw-Hill 2008. ISBN: 978-007-123246-3.

HOPPE 2017

Hoppe, S.: Keine Industrie 4.0 ohne OPC UA. In: Schleipen, M. (Hrsg.): Praxishandbuch OPC UA. Grundlagen - Implementierung - Nachrüstung - Praxisbeispiele. Würzburg: Vogel Business Media 2017, S. 15-19. ISBN: 978-3-834-33413-8.

HOPPE & WOOLF 2004

Hohpe, G.; Woolf, B.: Enterprise integration patterns: Designing, building, and deploying messaging solutions. The Addison-Wesley signature series. Boston: Addison-Wesley. 2004. ISBN: 978-0-321-20068-6.

INDIRA & KANMANI 2011

Indira, K.; Kanmani, S.: Association Rule Mining Using Genetic Algorithm. In: Abraham, A.; Lloret M., J.; Buford, J. F.; Suzuki, J.; Thampi, S. M. (Hrsg.): Advances in Computing and Communications. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 639-648. ISBN: 978-3-642-22709-7.

ISO 19987

Information technology – EPC Information services – Specification (2015)

JÜNEMANN & BEYER 1998

Jünemann, R.; Beyer, A.: Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen: Informations- und Steuerungssysteme, Automatisierungstechnik. 2. Aufl. Berlin: Springer 1998. ISBN: 978-3-540-64514-6.

KALLRATH 2013

Kallrath, J.: Gemischt-ganzzahlige Optimierung: Modellierung in der Praxis; mit Fallstudien aus Chemie, Energiewirtschaft, Papierindustrie, Metallgewerbe, Produktion und Logistik. 2. Aufl. Wiesbaden: Springer 2013. ISBN: 978-3-658-00689-1.

KARADGI & GRAUER 2014a

Karadgi, S.; Grauer, M.: First Steps towards an Event-Driven Reference Architecture in Manufacturing. In: Kundisch, D.; Suhl, L.; Beckmann, L. (Hrsg.): Tagungsband Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2014 (MKWI 2014). Paderborn, 26.-28. Februar 2014. Paderborn: Universität Paderborn 2014, S. 351–362. ISBN: 978-3-00-045311-3.

KARADGI & GRAUER 2014b

Karadgi, S.; Grauer, M.: First Steps towards an Event-Driven Reference Architecture in Manufacturing. In: Kundisch, D.; Suhl, L.; Beckmann, L. (Hrsg.): Tagungsband Multikonferenz Wirtschaftsinformatik 2014 (MKWI 2014). Paderborn, 26.-28. Februar 2014. Paderborn: Universität Paderborn 2014, S. 351–362. ISBN: 978-3-00-045311-3.

KASAKOW ET AL. 2016

Kasakow, G.; Menck, N.; Aurich, J.: Event-driven production planning and control based on individual customer orders. Procedia CIRP 57 (2016), S. 434–438.

KERN 2007

Kern, C.: Anwendung von RFID-Systemen. 2. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 9783540444770.

KIM & OUSSENA 2012

Kim, H.; Oussena, S. (Hrsg.): A Case Study on Modeling of Complex Event Processing in Enterprise Architecture. 2012.

KIRSCH ET AL. 2017

Kirsch, C.; Kerner, S.; Bubeck, A.; Gruhler, M.: Schlüsseltechnologien für intelligente, mobile Transport- und Automatisierungsplattformen. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0 Bd.3. Logistik. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 119-135. ISBN: 978-3-662-53250-8.

KLEIN 2015

Klein, A. (Hrsg.): Unternehmenssteuerung mit Kennzahlen: Inkl. Arbeitshilfen online; Auswahl, Ermittlung, Analyse, Kommunikation. 1. Aufl.: Haufe Verlag 2015. ISBN: 9783648066775.

KLETTI 2006

Kletti, J. (Hrsg.): MES - Manufacturing Execution System. Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 9783540280101.

KRCMAR 2011

Krcmar, H.: Einführung in das Informationsmanagement. 1 Aufl. Berlin: Springer 2011. ISBN: 978-3-642-15831-5.

KROPP 2016

Kropp, S. K.: Entwicklung eines Ereignismodells als Grundlage der Produktionsregelung. 1. Aufl. Aachen: Apprimus Verlag 2016. ISBN: 978-3-86359-399-5.

KRUMEICH ET AL. 2014

Krumeich, J.; Weis, B.; Werth, D.; Loos, P.: Event-Driven Business Process Management: where are we now? A comprehensive synthesis and analysis of literature. Business Process Management Journal 20 (2014) 4, S. 615-633.

KRUMEICH ET AL. 2015

Krumeich, J.; Mehdiyev, N.; Werth, D.; Loos, P.: Towards an Extended Metamodel of Event-Driven Process Chains to Model Complex Event Patterns. In: Jeusfeld, M. A.; Karlapalem, K. (Hrsg.): Advances in Conceptual Modeling, S. 119-130. Cham: Springer International Publishing 2015. ISBN: 978-3-319-25747-1.

KRUMEICH ET AL. 2016

Krumeich, J.; Zapp, M.; Mayer, D.; Werth, D.; Loos, P.: Modeling Complex Event Patterns in EPC-Models and Transforming them into an Executable Event Pattern Language. In: Stelzer D.; Nissen V.; Straßburger S. (Hrsg.): Tagungsband zur Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI 2016). Multikonferenz Wirtschaftsinformatik (MKWI-2016), S. 81-92, Ilmenau: Universitätsverlag Ilmenau 2016.

KURBEL 2005

Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. 6. Aufl. München [u.a.]: Oldenbourg 2005. ISBN: 3-486-57578-3.

LANGER & ROLAND 2010

Langer, J.; Roland M.: Anwendungen und Technik von Near Field Communication (NFC). 1.Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 978-3-642-05496-9

LEHNER ET AL. 2008

Lehner, F.; Wildner S.; Scholz, M.: Wirtschaftsinformatik: Eine Einführung. 2. Aufl. München: Hanser 2008. ISBN: 978-3-446-41572-0.

LEITÃO 2009

Leitão, P.: Agent-based distributed manufacturing control: A state-of-the-art survey. Engineering Applications of Artificial Intelligence 22 (2009) 7, S. 979-991.

LEITÃO & VRBA 2011

Leitão, P.; Vrba, P.: Recent Developments and Future Trends of Industrial Agents. In: Mařík, V.; Vrba, P.; Leitão, P. (Hrsg.): Holonic and Multi-Agent Systems for Manufacturing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2011, S. 15-28. ISBN: 978-3-642-23181-0.

LENGSFELD & LACALLE 2014

Lengsfeld, H.; Lacalle, J.: Prepregs Verarbeitungstechnologie. In: Lengsfeld H.; Wolff-Fabris F.; Krämer J.; Lacalle J.; Altstädt V. (Hrsg.): Faserverbundwerkstoffe. Prepregs und ihre Verarbeitung. München: Carl Hanser Verlag 2014. ISBN: 978-3-446-43300-7.

LENGSFELD & TURNER 2014

Lengsfeld, H.; Turner, M.: Prepreg-Technologie. In: Lengsfeld H.; Wolff-Fabris F.; Krämer J.; Lacalle J.; Altstädt V. (Hrsg.): Faserverbundwerkstoffe. Prepregs und ihre Verarbeitung. München: Carl Hanser Verlag 2014, S. 27-46. ISBN: 978-3-446-43300-7.

LENGSFELD 2014

Lengsfeld, H.: Design und Produktion. In: Lengsfeld H.; Wolff-Fabris F.; Krämer J.; Lacalle J.; Altstädt V. (Hrsg.): Faserverbundwerkstoffe. Prepregs und ihre Verarbeitung. München: Carl Hanser Verlag 2014, S. 177–199. ISBN: 978-3-446-43300-7.

LENGSFELD ET AL. 2014

Lengsfeld, H.; Wolff-Fabris, F.; Krämer, J.; Lacalle J.; Altstädt V. (Hrsg.): Faserverbundwerkstoffe: Prepregs und ihre Verarbeitung. München: Carl Hanser Verlag 2014. ISBN: 978-3-446-43300-7.

LENZ & MÜLLER 2013

Lenz, H.-J.; Müller, R. M.: Business-Intelligence. 1., 2014 Aufl. Berlin: Springer Berlin 2013. ISBN: 978-3-642-35559-2.

LINDEMANN 2007

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2007. ISBN: 978-3-540-37435-0.

LIU 2012

Liu, B.: Web Data-Mining: Exploring Hyperlinks, Contents, and Usage Data. 2nd ed. Aufl. Berlin: Springer 2012. ISBN: 978-3-642-19459-7.

LÖDDING 2008

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2., erw. Aufl. Aufl. Berlin, Heidelberg [u.a.]: Springer 2008. ISBN: 978-3-540-76860-9.

LÖDDING 2016

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2016. ISBN: 9783662484586.

LOUIS 2009

Louis, J. P.: Manufacturing Execution Systems: Grundlagen und Auswahl, Dissertation Universität Marburg. Wiesbaden: Springer Gabler 2009. ISBN: 978-3-8349-1018-9.

LUCKHAM 2002

Luckham, D. C.: The power of events: An introduction to complex event processing in distributed enterprise systems. 1. Aufl. Boston: Addison-Wesley 2002. ISBN: 0201727897.

LUCKHAM 2007

Luckham, D.: SOA, EDA, BPM and CEP are all Complementary. 2007. http://www.complexevents.com/wp-content/uploads/2007/05/SOA_EDA_Part_1.pdf. Zuletzt aufgerufen am 29.03.2018

LUCKHAM & SCHULTE 2012

Luckham, C.; Schulte W. R.: Glossary of the terminology: The event processing technical society (EPTS) Glossary of terms - Version 2.0. In: Event Processing for Business: Organizing the Real-Time Enterprise. New Jersey: Wiley 2012. ISBN 978-0-470-53485-4.

MARCZINSKI 2008

Marczinski, G.: Einsatzgebiete von ERP-, APS und MES-Lösungen. ERP Management 4 (2008), S. 62-64.

MARGARA ET AL. 2014

Margara, A.; Cugola, G.; Tamburelli, G.: Learning from the past: automated rule generation for complex event processing. (Hrsg.): Proceedings of the 8th ACM International Conference on Distributed Event-Based Systems: May 26-29, 2014, Mumbai, India, S. 47-58.

MAYER ET AL. 2016

Mayer, J.; Pielmeier, J.; Berger, C.; Engehausen, F.; Hempel, T.; Hünnekes P.: Aktuelle Herausforderungen der Produktionsplanung und -steuerung mittels Industrie 4.0 begegnen. Garbsen: PZH Verlag 2016. ISBN: 978-3-95900-104-3.

MERTENS 2013

Mertens, P.: Integrierte Informationsverarbeitung 1: Operative Systeme in der Industrie. 18. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler 2013. ISBN: 978-3-8349-4394-1.

METZ 2014

Metz, D.: Concept of a real-time enterprise in manufacturing: Design and implementation of a framework based on EDA and CEP. Wiesbaden: Springer Gabler 2014. ISBN: 978-3-658-03749-9.

MICHELSON 2006

Michelson, B. M.: Event-Driven Architecture: Event-driven SOA is just part of the EDA Story, 2006. <http://dx.doi.org/10.1571/bda2-2-06cc>. Zuletzt aufgerufen am 23.01.2018.

MÖNCH 2006

Mönch, L.: Agentenbasierte Produktionssteuerung komplexer Produktionssysteme. New York: Deutscher Universitäts-Verlag GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden (GWV) 2006. ISBN: 3-8350-0249-X.

MONOSTORI ET AL. 2006

Monostori, L.; Váncza, J.; Kumara, S.R.T.: Agent-Based Systems for Manufacturing. CIRP Annals 55 (2006) 2, S. 697-720.

MOUSHEIMISH ET AL. 2016

Mousheimish, R.; Taher, Y.; Zeitouni, K.: autoCEP. In: Sheng, Q. Z.; Stroulia, E.; Tata, S.; Bhiri, S. (Hrsg.): Service-Oriented Computing. Cham: Springer International Publishing 2016, S. 586-593. ISBN: 978-3-319-46295-0.

MÜLLER & RIEDEL 2014

Müller E.; Riedel, R.: Humanzentrierte Entscheidungsunterstützung in intelligent vernetzten Produktionssystemen. In: Kersten, W.; Koller H.; Lödding H. (Hrsg.): Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. Berlin: Gito 2014, S. 211–237. ISBN: 978-3-95545-083-0.

NIEHUES ET AL. 2017

Niehues, M.; Reinhart, G.; Schmitt R. H.; Schuh G.; Brambring F.; Ellerich M.; Elser H.; Frank D.; Groggert S.; Gützlaff A.; Heinrichs V.; Hempel T.; Kostyszyn K.; Ngo H.; Niendorf L.; Permin E.; Prote J.-P.; Reuter C.; Türtmann R.: Organisation, Qualität und IT-Systeme für Planung und Betrieb. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017, S. 137-167. ISBN: 978-3-446-44642-7.

NYHUIS ET AL. 2010

Nyhuis, P.; Münzberg, B.: Konfiguration der Fertigungssteuerung: Berücksichtigung unternehmensspezifischer Anforderungen. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 4, S. 285-290.

NYHUIS & WIENDAHL 2012

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 3. Aufl. 2012 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg 2012. ISBN: 978-3-540-92839-3.

OEY 2006

Oey, K. J.: Nutzen und Kosten von serviceorientierten Architekturen. Diss., Universität Köln (2006).

OMG 2008

Object Management Group (OMG): Event Metamodel and Profile (EMP) RFP Wiki. 2008. http://www.omgwiki.org/soaeda/doku.php#current_status. Zuletzt aufgerufen am 24.01.2018.

OMG 2017

Object Management Group (OMG): Unified Modeling Language, formal/2017-12-05, v2.5.1. <http://www.omg.org/spec/UML/2.5.1/PDF>. Zuletzt aufgerufen am 06.02.2018.

OMICINI & MARIANI 2013

Omicini, A.; Mariani, S.: Coordination for Situated MAS: Towards an Event-driven Architecture. In: Moldt, D.; Rölke, H. (Hrsg.): International Workshop on Petri Nets and Software Engineering. Milano, Italy, 24.- 25.06.2013. Aachen: Universität 2013, S. 17-22.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. München: Utz 2012. ISBN: 978-3-8316-4206-9. (Forschungsberichte *iwb*, 265).

TENEROWICZ-WIRTH 2013

Tenerowicz-Wirth, P.: Kommunikationskonzept für selbststeuernde Fahrzeugkollektive in der Intralogistik. 2013. ISBN: 978-3941702332.

PETERS & ZELEWSKI 2002

Peters, M. L.; Zelewski, S.: Analytical Hierarchy Process (AHP) – dargestellt am Beispiel der Auswahl von Projektmanagement-Software zum Multiprojektmanagement (Arbeitsbericht) Institut für Produktion und Industrielles Informationsmanagement Universität Essen (2002). https://www.pim.wiwi.uni-due.de/uploads/tx_itochair3/publications/bericht14.pdf. Zuletzt aufgerufen am 13.03.2018.

PETERSOHN 2005

Petersohn, H.: Data-Mining: Verfahren, Prozesse, Anwendungsarchitektur. München, Wien: Oldenbourg 2005. ISBN: 978-3-486-57715-0.

PHILIPP 2014

Philipp, T.: RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. München: Utz 2014. ISBN: 978-3-831-64346-2. (Forschungsberichte *iwb*, 282).

PIELMEIER ET AL. 2016

Pielmeier, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, Gunther (Hrsg.): Situational Handling of Events for Industrial Production Environments, New York, USA, July 6-9, 2016.

PIELMEIER ET AL. 2017

Pielmeier, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Modeling Approach for Situational Event-handling within Production Planning and Control Based on Complex Event Processing. *Procedia CIRP* 63 (2017), S. 271-276.

PIELMEIER ET AL. 2018A

Pielmeier, J.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Approach for Defining Rules in the Context of Complex Event Processing. *Procedia CIRP* 67 (2018), S. 8-12.

PIELMEIER ET AL. 2018B

Pielmeier, J.; Theumer P.; Beesdo O.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Development of a methodology for event-based production control. The 51th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Stockholm, Sweden, May 16-18, 2018.

PIELMEIER ET AL. 2018C

Pielmeier, J.; Schutte C.; Snyman S.; Beesdo O.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Method for event-based production control., 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, Gulf of Naples, Italy, 18 - 20 July 2018

POGGENSEE 2015

Poggensee, K.: Investitionsrechnung: Grundlagen - Aufgaben - Lösungen. 3., überarb. Aufl. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler 2015. ISBN: 978-3-658-03090-2. (O+, OnlinePlus).

POWER 2002

Power, D. J.: Decision support systems: Concepts and resources for managers. Westport CT: Quorum Books 2002. ISBN: 978-1567204971.

PRESTIFILIPPO 2017

Prestifilippo, G.: Auswirkungen von Industrie 4.0 auf Warehouse-, Transport- und Supply-Chain-Management-Systeme. In: Vogel-Heuser, B.; Bauernhansl, T.; ten Hompel, M. (Hrsg.): *Handbuch Industrie 4.0 Bd.3. Logistik*. Berlin: Springer Vieweg 2017, S. 219-231. ISBN: 978-3-662-53250-8.

REINHART & GYGER 2009

Reinhart, G.; Gyger, T. (2009): Identifikation impliziter Strategien in der Produktionssteuerung zum Aufbau von Simulationsmodellen. In: Albrecht

Gnauck (Hg.): 20. Symposium Simulationstechnik. Cottbus: Technosatz, S. 286-293.

REINHART ET AL. 2013

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Geiger, F.; Philipp, T. R.; Wahlster, W.; Zühlke, D.; Schlick, J.; Becker, T.; Löckelt, M.; Pirvu, B.; Stephan, P.; Hodek, S.; Scholz-Reiter, B.; Thoben, C.; Gorltd, C.; Hribernik, K. A.; Lappe, D.; Veigt, M.: Cyber-Physische Produktionssysteme: Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2, S. 84-89.

REINHART ET AL. 2015

Reinhart, G.; Scholz-Reiter B.; Wahlster W.; Wittenstein M.; Zühlke D.: Intelligente Vernetzung in der Fabrik: Industrie 4.0 Umsetzungsbeispiele für die Praxis. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag. 2015. ISBN: 9783839609309.

REINHART & ZÜLKE 2017

Reinhart G.; Zülke. D.: Von CIM zu Industrie 4.0. In: Reinhart, G. (Hrsg.): Handbuch Industrie 4.0. Geschäftsmodelle, Prozesse, Technik. München: Hanser 2017. ISBN: 978-3-446-44642-7.

REINSEL ET AL. 2017

Reinsel, D.; Gantz, J.; Rydning J: Data Age 2025: The Evolution of Data to Life-Critical. IDC Withe Paper (2017).

ROTHLAUF 2011

Rothlauf, F.: Design of Modern Heuristics: Principles and Application. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2011. ISBN: 978-3-540-72961-7.

ROZSNYAI ET AL. 2007

Rozsnyai, S.; Schiefer, J.; Schatten, A.: Concepts and models for typing events for event-based systems. In: Jacobsen, H.-A.; Mühl, G. (Hrsg.): DEBS 07. Toronto, Ontario, Canada, 20.06.2007 - 22.06.2007. New York, N.Y.: ACM Press 2007, S. 62. ISBN: 9781595936653.

RUNKLER 2015

Runkler, T. A.: Data-Mining: Modelle und Algorithmen intelligenter Datenanalyse. 2 Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg 2015.

SAATY 1994

Saaty, T. L.: Fundamentals of Decision Making and Priority Theory with the Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh: RWS Publications 1994. ISBN: 978-0-96203-176-2.

SAATY 2000

Saaty, T. L.: Fundamentals of the Analytic Hierarchy Process. Pittsburgh: RWS Publications 2000.

SCHMIDT ET AL. 2017

Schmidt, J.-P.; Zeller, A.; Weyrich, M.: Modellgetriebene Entwicklung serviceorientierter Anlagensteuerungen. at Automatisierungstechnik 65 (2017) 1, S. 26-36.

SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. CIRP Annals 56 (2007) 2, S. 712-729.

SCHOLZ-REITER & HÖHNS 2006

Scholz-Reiter, B.; Höhns, H.: Selbststeuerung logistischer Prozesse mit Agentensystemen. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. Berlin: Springer 2006, S. 745–780. ISBN: 978-3-540-40306-7.

SCHÖNING & DORCHAIN 2014

Schöning, H.; Dorchain, M.: Data-Mining und Analyse. In: Bauernhansl, T.; Hompel, M. ten; Vogel-Heuser, B. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung · Technologien · Migration. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden 2014, S. 543-554. ISBN: 978-3-658-04681-1.

SCHREIBER 2013

Schreiber, S.: Entwicklung einer Vergleichs- und Bewertungsmöglichkeit von dezentralen Steuerungsarchitekturen für Produktionssysteme. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH 2013. ISBN: 9783183448203. (Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 20, Rechnerunterstützte Verfahren, Nr. 448).

SCHUH ET AL. 2014

Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A.: Steigerung der Kollaborationsproduktivität durch cyber-physische Systeme. In: Bauernhansl, T. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. ISBN: 978-3-658-04681-1.

SCHUH & STICH 2012

Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: 1. Grundlagen der PPS. 4. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg 2012. ISBN: 978-3-642-25422-2.

SCHUH ET AL. 2015

Schuh, G.; Reuter, C.; Hauptvogel A., Brambring F.; Hempel T.: Einleitung. In: Schuh, G. (Hrsg.): Prosense. Ergebnisbericht des BMBF-Verbundprojektes; hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik, S. 1-13. ISBN: 978-3-86359-346-9.

SCHWARTZ 2004

Schwartz, F.: Störungsmanagement in Produktionssystemen. Aachen: Shaker 2004. ISBN: 3-8322-3088-2. (Schriften zur quantitativen Betriebswirtschaftslehre und Wirtschaftsinformatik).

SHARAFI 2013

Sharafi, A.: Knowledge discovery in databases: Eine Analyse des Änderungsmanagements in der Produktentwicklung. Wiesbaden: Springer Gabler 2013. ISBN: 978-3-658-02001-9.

SHARON & ETZION 2008

Sharon, G.; Etzion, O.: Event-processing network model and implementation. IBM Systems Journal 47 (2008) 2, S. 321-334.

SIMON 1995

Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer 1995. ISBN: 978-3-540-58942-6. (Forschungsberichte *iwb* 85).

SPRINGER 2017

Springer, F.: Echtzeit- und Ereignisorientierung in Kreditinstituten: Referenzmodell zur Optimierung der Informationsversorgung und -nutzung. 1. Aufl. Wiesbaden: Springer Gabler 2017. ISBN: 978-3-658-18614-2.

STANGL ET AL. 2016

Stangl, M.; Pielmeier, J.; Berger, C.; Braunreuther, S.; Reinhart, G.: Development of a Web Based Monitoring System for a Distributed and Modern Production. Procedia CIRP 52 (2016), S. 222-227.

TAHYUDIN & NAMBO 2017

Tahyudin, I.; Nambo, H.: The Combination of Evolutionary Algorithm Method for Numerical Association Rule Mining Optimization. In: Xu, J.; Hajiyev, A.; Nickel, S.; Gen, M. (Hrsg.): Proceedings of the Tenth International Conference on Management Science and Engineering Management 2017, S. 13–23. ISBN: 9789811018367.

THEORIN ET AL. 2015

Theorin, A.; Bengtsson, K.; Provost, J.; Lieder, M.; Johnsson, C.;Lundholm, T.; Lennartson, B.: An Event-Driven Manufacturing Information System Architecture. IFAC-PapersOnLine 48 (2015) 3, S. 547-554.

THEORIN ET AL. 2017

Theorin, A.; Bengtsson, K.; Provost, J.; Lieder, M.; Johnsson, C.;Lundholm, T.; Lennartson, B.: An event-driven manufacturing information system architecture for Industry 4.0. International Journal of Production Research 55 (2017) 5, S. 1297-1311.

THIEL ET AL. 2008

Thiel, K.; Meyer, H.; Fuchs, F.: MES - Grundlage der Produktion von morgen. effektive Wertschöpfung durch die Einführung von Manufacturing Execution Systems. 2 Aufl. München: Oldenbourg.

TRZYNA ET AL. 2015

Trzyna, D.; Lödding, H.; Nyhuis, P.: Modellierung und Steuerung von Eilaufträgen in der Produktion. @Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Institut für Produktionsmanagement und -technik, Diss., 2015. [Elektronische Ressource] Aufl, Technische Universität Hamburg-Harburg 2015. ISBN: 16138244.

ULRICH & HILL 1979A

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil I). Wirtschaftswissenschaftliches Studium (1979) 7, S. 305-309.

ULRICH & HILL 1979B

Ulrich, P.; Hill, W.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). Wirtschaftswissenschaftliches Studium (1979) 8, S. 345-350.

ULRICH, H. 1981

Ulrich, H.: Die Betriebswirtschaftslehre als anwendungsorientierte Sozialwissenschaft. In: Sandig, C., Geist, M. N. und Köhler, R. (Hg.): Die Führung des Betriebes. Stuttgart: Poeschel. S. 1-26.

VAN BRUSSEL ET AL. 1998

van Brussel, H.; Wyns, J.; Valckenaers, P.; Bongaerts, L.; Peeters, P.: Reference architecture for holonic manufacturing systems: PROSA. Computers in Industry 37 (1998) 3, S. 255-274.

VDI 4400

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4400 (Blatt 2): Logistikkennzahlen für die Produktion. Berlin: Beuth 2004.

VDI 4416

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4416: Betriebsdatenerfassung und Identifikation - Identifikationssysteme. Berlin: Beuth 1998.

VDI 3633

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI 3633 Blatt 12:2016-05 - Entwurf: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Simulation und Optimierung. Berlin: Beuth 2016.

VDI/VDE GMA 2015

VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik: Statusbericht; Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI4.0). Düsseldorf: VDI e.V., 2015.

VDI 5600

VDI Verein Deutsche Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1: Fertigungsmanagementsysteme. Berlin: Beuth 2007.

VERL & LECHLER 2014

Verl, A.; Lechler, A.: Steuerung aus der Cloud. In: Bauernhansl, T. (Hrsg.): Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik. Anwendung, Technologien, Migration. Wiesbaden: Springer Vieweg 2014. S. 235-247. ISBN: 978-3-658-04681-1.

VIDAČKOVIĆ 2014

Vidačković, K.: Eine Methode zur Entwicklung dynamischer Geschäftsprozesse auf Basis von Ereignisverarbeitung. Dissertation Universität Stuttgart. Stuttgart: Fraunhofer-Verl. 2014. ISBN: 978-3-8396-0772-5.

VOEGELE & SOMMER 2012

Voegele, A. A.; Sommer, L.: Kosten- und Wirtschaftlichkeitsrechnung für Ingenieure: Kostenmanagement im Engineering. 1. Aufl. München: Hanser 2012. ISBN: 978-3-446-42617-7.

VOGL 2009

Vogl, W.: Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern. Dissertation, Technische Universität München. München: Utz 2009. ISBN: 9783831608690. (Forschungsberichte *iwb* 228).

WALZER ET AL. 2008

Walzer, K.; Rode, J.; Wünsch, D.; Groch, M.: Event-Driven Manufacturing: Unified Management of Primitive and Complex Events for Manufacturing Monitoring and Control. In: Cena, G. (Hrsg.): IEEE International Workshop on Factory Communication Systems. Dresden, 21.- 23. Mai 2008. Piscataway, NJ: IEEE 2008, S. 383–391. ISBN: 978-1-4244-2349-1.

WEISS 1999

Weiss, G.: Multiagentsystems: A modern approach to distributed artificial intelligence. Cambridge Mass.: MIT Press 1999.

WENZEL 2000

Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodell für die Simulation in Produktion und Logistik. Gent: Society for Computer Simulation International 2000. ISBN: 1-56555-182-6.

WENZEL ET AL. 2008

Wenzel, S.; Collisi-Böhmer, S.; Pitsch, H.; Rose, O.; Weiß, M.: Qualitätskriterien für die Simulation in Produktion und Logistik: Planung und Durchführung von Simulationsstudien. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008. ISBN: 978-3-54035-272-3.

WESTKÄMPER & LÖFFLER 2016

Westkämper, E.; Löffler, C.: Strategien der Produktion, Technologien, Konzepte und Wege in die Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2016. ISBN 978-3-662-48913-0.

WIENDAHL 1997

Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. München: Hanser 1997. ISBN: 978-344-619084-9.

WIENDAHL ET AL. 2005

Wiendahl, H.-H.; Wiendahl, H.-P.; Cieminski, G. von: Stolpersteine der PPS: Symptome - Ursachen - Lösungsansätze. wt Werkstatttechnik online 95 (2005) 9, S. 717-725.

WIENDAHL 2008

Wiendahl, H.-H.: Stolpersteine der PPS. ein sozio-technischer Ansatz für das industrielle Auftragsmanagement. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008, S. 275-304. ISBN: 978-3-540-75642-2.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 978-3-446-41878-3.

WIENDAHL 2014

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 8. Aufl. München: Hanser, Carl 2014. ISBN: 978-3-446-44053-1.

WINDT ET AL. 2010

Windt, K.; Scholz-Reiter, B.; Jeken, O.; Tecke, M.: Selbststeuernde Produkte in globalen Produktionsnetzen: Erschließung von Flexibilitätspotenzialen. *Industrie Management* 26 (2010) 5, S. 23-26.

WINKELHAKE 2017

Winkelhake, U.: Die digitale Transformation der Automobilindustrie, Treiber, Roadmap, Praxis. Berlin: Springer Vieweg 2017: ISBN 978-3-662-54934-6.

WITTEN & FRANK 2001

Witten, I. H.; Frank E.: *Data-Mining: Praktische Werkzeuge und Techniken für das maschinelle Lernen*. Praktische Werkzeuge und Techniken für das maschinelle Lernen. München: Hanser. 2001. ISBN: 3-44-621533-6.

YANG ET AL. 2015

Yang, J.; Ma, M.; Wang, P.; Lui, L.: *From Complex Event Processing to Cognitive Event Processing: Approaches, Challenges and Opportunities*. IEEE UIC-ATC-ScalCom (2015).

ZHANG 2002

Zhang C., Z. S.: *Association Rule Mining: Models and Algorithms*: Springer Berlin / Heidelberg 2002. ISBN: 3-540-43533-6.

ZHANG ET AL. 2009

Zhang, Y. H.; Dai, Q. Y.; Zhong, R. Y.: *An Extensible Event-Driven Manufacturing Management with Complex Event Processing Approach*. *International Journal of Control and Automation* 3 (2009) 2, S. 13-24.

12 Betreute Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation wurden unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin an der Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik (IGCV) Studienarbeiten betreut. Diese haben sich mit Fragestellungen der ereignisbasierten Produktionssteuerung, der Mustererkennung und CEP-Systemen befasst. Inhalte und Erkenntnisse aus diesen Arbeiten sind teilweise in die vorliegende Dissertation eingegangen. Die Autorin dankt den Studierenden für ihr Engagement. Im Folgenden sind die betreuten Studienarbeiten in alphabetischer Reihenfolge des Nachnamens der Autorinnen und Autoren aufgeführt.

Bayerl, Christina

Kennzahlenbasierte Datenanalyse zur Ableitung situationsspezifischer Steuerungsstrategien für autonome Transportsysteme

Bochtler, Maximilian

Entwicklung einer Regelgestaltung und Kommunikationsstruktur für eine CEP-Engine

Frey, Lennart

Wissensextraktion und Regelableitung für die ereignisorientierte Produktionssteuerung industrieller Produktionsumgebungen

Geyer, Kristina

Entwicklung einer Methode zur Auftragskoordination für autonome Transportsysteme in der Automobilindustrie

Heinen Lukas

Entwicklung einer Methode zur Produktionssteuerung für eine wandlungsfähige Automobilproduktion

Herkommer, Marion

Entwicklung eines Stufenmodells für die ereignisbasierte Behandlung von Störungen in der Produktion

Jäger, Jonas

Transformation von ereignisorientierten Geschäftsprozessmodellen zu einer ausführbaren Event Processing Language im Rahmen von Complex Event Processing

Schmid, Marc

Entwicklung einer kaskadierten Regelableitung für die ereignisbasierte Produktionsplanung und -steuerung industrieller Produktionsumgebungen

Theumer, Philipp

Entwicklung eines intelligenten, situativen Materialmanagements für eine CFK-Serienfertigung