

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Lehrstuhl für Betriebswissenschaften und Montagetechnik
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**System für die RFID-gestützte
situationsbasierte Produktionssteuerung in der
auftragsbezogenen Fertigung und Montage**

Philipp Ronald Engelhardt

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: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
(Karlsruher Institut für Technologie)

Die Dissertation wurde am 08.09.2014 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.02.2015
angenommen.

Philipp Ronald Engelhardt

**System für die RFID-gestützte situationsbasierte
Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen
Fertigung und Montage**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 299

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2015

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4472-8

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

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 wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Projektgruppe für Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Augsburg sowie am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Frau Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza, der Inhaberin des Lehrstuhls für Produktionssysteme und Qualitätsmanagement des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) und Institutsleiterin am Institut für Produktionstechnik (wbk), möchte ich mich für die Übernahme des Korreferats und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Zudem möchte ich mich bei Herrn Prof. László Monostori und Herrn Dr. Botond Kádár für die wissenschaftlichen Freiräume und ihre Gastfreundschaft während meines dreimonatigen Forschungsaufenthaltes in Budapest am Fraunhofer Project Center for Production Management and Informatics (PMI) herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Institute sowie allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Mein besonderer Dank gilt meinen Freunden und ehemaligen Kollegen Emin Genc, Stefan Krottil, Martin Ostgathe, Tobias Philipp und Marc Weidner für die zahlreichen fachlichen Diskussionen sowie die kritische Durchsicht meiner Arbeit. Ihre konstruktiven Anmerkungen ermöglichten es mir, diese Arbeit qualitativ abzurunden.

Schließlich möchte ich mich besonders bei meiner Familie bedanken, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mich in all den Jahren liebevoll unterstützt hat. In besonderem Maße danke ich Marion für ihre immerwährende Motivation, ihre liebevolle Unterstützung und ihr Verständnis für die Arbeit an der Dissertation.

München, im März 2015

Philipp Engelhardt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	i
Abkürzungsverzeichnis.....	vii
Verzeichnis der Formelzeichen.....	xiii
1 Einleitung	1
1.1 Gegenwärtige Situation produzierender Unternehmen	1
1.2 Motivation der Arbeit.....	3
1.3 Zielsetzung der Arbeit.....	5
1.4 Aufbau der Arbeit.....	7
2 Grundlagen.....	9
2.1 Übersicht	9
2.2 Produktionstypen.....	9
2.2.1 Allgemeines	9
2.2.2 Fertigungsarten	9
2.2.3 Fertigungsprinzipien.....	10
2.2.4 Teilefluss.....	11
2.2.5 Materialflusskomplexität und Variantenanzahl	11
2.2.6 Kapazitäts- und Belastungsflexibilität	12
2.3 Produktionsplanung und -steuerung	12
2.3.1 Allgemeines	12
2.3.2 Logistische Zielgrößen	13
2.3.3 Grundlagen der Produktionsplanung	16

2.3.4	Grundlagen der Produktionssteuerung.....	17
2.4	Informationsmanagement in der Produktion.....	20
2.4.1	Begriffsdefinitionen.....	20
2.4.2	Informations- und Kommunikationstechnologien.....	21
2.4.3	Grundlagen der RFID-Technologie.....	25
3	Anforderungen an eine zeitgemäße Produktionssteuerung.....	27
3.1	Allgemeines.....	27
3.2	Flexibilität und Adaptierbarkeit.....	27
3.3	Modularisierung und Synchronisierung.....	28
3.4	Informationstransparenz und Situationsbezogenheit.....	28
3.5	Referenzarchitektur und Informationsmanagement.....	29
3.6	Leitsätze für zeitgemäße Produktionssteuerungsverfahren.....	29
4	Stand der Forschung und Technik.....	31
4.1	Übersicht.....	31
4.2	Ansätze zur Steuerung von Produktionsabläufen.....	31
4.2.1	Allgemeines.....	31
4.2.2	Konventionelle Verfahren zur Produktionssteuerung.....	32
4.2.3	Adaptive Ansätze zur Produktionssteuerung.....	39
4.2.4	Ansätze zur Modularisierung in der Produktion.....	46
4.2.5	Zwischenfazit.....	47
4.3	Organisationsstrukturen der Produktionssteuerung.....	48
4.3.1	Allgemeines.....	48
4.3.2	Organisationsstrukturen von Produktionssteuerungssystemen.....	48
4.3.3	Zwischenfazit.....	51

4.4	Strukturierung steuerungsrelevanter Informationen.....	51
4.4.1	Allgemeines	51
4.4.2	Modellierung auftrags- und produktbezogener Informationen	52
4.4.3	Ansätze zur zentralen und dezentralen Datenhaltung.....	54
4.4.4	Richtlinien zur dezentralen Datenstrukturierung.....	55
4.4.5	Zwischenfazit.....	58
4.5	Handlungsbedarf	59
5	Systemübersicht	61
5.1	Allgemeines.....	61
5.2	Systemelemente.....	61
6	Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung	65
6.1	Übersicht	65
6.2	Produktbezogene Modularisierungsprinzipien	68
6.2.1	Allgemeines	68
6.2.2	Modularisierung durch Produkt-Arbeitssystem-Matrix	68
6.2.3	Modularisierung durch produktbezogene Clusteranalyse	70
6.3	Ressourcenbezogene Modularisierungsprinzipien	75
6.3.1	Allgemeines	75
6.3.2	Modularisierung nach fertigungstechnischen Abhängigkeiten	76
6.3.3	Modularisierung von Engpass-Arbeitssystemen	76
6.3.4	Modularisierung von Montage-Arbeitssystemen.....	77
6.4	Steuerungsbezogene Modularisierungsprinzipien.....	78
6.4.1	Allgemeines	78
6.4.2	Modularisierung zur synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe	78

6.4.3	Modularisierung zur situationsbasierten Reihenfolgebildung.....	82
6.4.4	Modularisierung zur intramodularen Rückstandsregelung	83
6.5	Fazit	83
7	RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement	85
7.1	Übersicht	85
7.2	Referenzarchitektur	86
7.2.1	Allgemeines	86
7.2.2	Zentrale Steuerungselemente	88
7.2.3	Dezentrale Steuerungselemente	93
7.2.4	Daten und Datenstrukturen	98
7.3	Fazit	102
8	Situationsbasierte Steuerungsverfahren.....	103
8.1	Übersicht	103
8.2	Synchrone zweistufige Auftragsfreigabe	104
8.2.1	Allgemeines	104
8.2.2	Erste Freigabestufe der synchronen Auftragsfreigabe.....	105
8.2.3	Zweite Freigabestufe der synchronen Auftragsfreigabe.....	110
8.3	Situationsbasierte Reihenfolgebildung	113
8.3.1	Allgemeines	113
8.3.2	Situationsbasierte Reihenfolgebildungsverfahren	114
8.3.3	Intermodulare Schlupfzeitverteilung	117
8.4	Intramodulare Rückstandsregelung	128
8.4.1	Allgemeines	128
8.4.2	Verfahren der intramodularen Rückstandsregelung	129

8.5 Fazit	133
9 Technische Umsetzung und Validierung	135
9.1 Übersicht	135
9.2 Technische Umsetzung	135
9.2.1 Umsetzung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements in der Automobilindustrie	135
9.2.2 Umsetzung situationsbasierter Steuerungsverfahren in SAP ME ..	139
9.2.3 Zwischenfazit.....	142
9.3 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung	143
9.3.1 Allgemeines	143
9.3.2 Situationsbasierte Produktionssteuerung in der Fließmontage.....	144
9.3.3 Situationsbasierte Reihenfolgebildung in der Werkstattfertigung .	154
9.3.4 Zwischenfazit.....	160
9.4 Bewertung	162
9.4.1 Anforderungsbezogene Bewertung.....	162
9.4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	163
9.5 Fazit	171
10 Schlussbetrachtung	173
10.1 Zusammenfassung.....	173
10.2 Ausblick.....	174

11	Literaturverzeichnis	177
12	Abbildungsverzeichnis.....	199
13	Tabellenverzeichnis.....	203
14	Anhang	205
	14.1 Studienarbeiten.....	205
	14.2 Genutzte Softwareprodukte	207

Abkürzungsverzeichnis

APS	Advanced Planning and Scheduling
AS	Arbeitssystem
Auto-ID	automatische Identifikation
AV	Arbeitsvorgang
BDE	Betriebsdatenerfassung
BKT	Betriebskalendertag
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CIM	Computer Integrated Manufacturing (Rechnerintegrierte Fertigung)
CNC	Computerized Numerical Control (Rechnergestützte Numerische Steuerung)
ConWIP	Constant Work In Process (Konstanter Umlaufbestand)
CPS	Cyber-Physical System (Cyber-Physisches System)
CSV	Comma Separated Value
d. h.	das heißt
DBF	Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DNC	Distributed Numerical Control (Verteilte Numerische Steuerung)
e. V.	eingetragener Verein
engl.	englisch
EPC	Electronic Product Code (elektronischer Produktcode)

Abkürzungsverzeichnis

EPCIS	Electronic Product Code Information Service
ERP	Enterprise Resource Planning
et al.	et alii (und andere)
etc.	et cetera (und so weiter)
EVS	Ereignisverwaltungssystem
FIFO	First In - First Out
FIR e. V.	Forschungsinstitut für Rationalisierung e. V. an der RWTH Aachen
FMS	Flexible Manufacturing System (Flexibles Fertigungssystem)
FPE	Frühester Plan-Endtermin
FPS	Frühester Plan-Starttermin
Fraunhofer IAO	Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation
Fraunhofer ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
Fraunhofer IWU	Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik
ggf.	gegebenenfalls
GHz	Gigahertz
GS1	Global Standards One
HF	High Frequency (Hochfrequenz)
HMS	Holonic Manufacturing System (Holonisches Fertigungssystem)
Hrsg.	Herausgeber
i. O.	in Ordnung
IEC	International Electrotechnical Commission (Internationale Elektrotechnische Kommission)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
iProdukt	intelligentes Produkt

IuK-Technologie	Informations- und Kommunikationstechnologie
<i>iwb</i>	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (der Technischen Universität München)
JAIF	Joint Automotive Industry Forum
JIS	Just-In-Sequence
KDD	Knowledge Discovery in Databases
kHz	Kilohertz
KS	Kostenstelle
LF	Low Frequency (Niederfrequenz)
LG	Lohngruppe
MAS	Multiagentensystem
max.	maximal
mDialog	Mitarbeiterdialog
MES	Manufacturing Execution System
MHz	Megahertz
min.	minimal
MRP	Material Requirements Planning
MRP II	Manufacturing Resources Planning
MW	Mikrowelle
n. i. O.	nicht in Ordnung
Nr.	Nummer
OCR	Optical Character Recognition (optische Zeichenerkennung)
OPC UA	OPC Unified Architecture
OPT	Optimized Production Technology
P_{ij}	Komponente j von Produkt i
PCo Agent	Plant Connectivity Agent
PIN	Persönliche Identifikationsnummer
PM	Produktionsmodul

Abkürzungsverzeichnis

Polca	Paired-Cell Overlapping Loops of Cards with Authorization
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
PT	Personentag
RM	Referenzmodell
RFID	Radio Frequency Identification (Radiofrequenz-Identifikation)
S.	Seite
SAP ME	SAP Manufacturing Execution
SAPCO	Segmentierte Adaptive Fertigungssteuerung
SAS	Steuerungsassistenzsystem
SFB	Sonderforschungsbereich
SPC	Statistische Prozesskontrolle
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
TBE	Bearbeitungsende
TBEV	Bearbeitungsende des Vorgängers
TKS	Terminorientierte Kapazitätssteuerung
TRA	Rüstanfang
u. a.	unter anderem
UHF	Ultra High Frequency (Ultrahochfrequenz)
UML	Unified Modeling Language (vereinheitlichte Modellierungssprache)
UTC	Coordinated Universal Time (Koordinierte Weltzeit)
v. a.	vor allem
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA e. V.	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vgl.	vergleiche
VM	Vergleichsmodell

WIP	Work In Process (Umlaufbestand)
WZL	Werkzeugmaschinenlabor der RWTH Aachen
XML	Extensible Markup Language (erweiterbare Auszeichnungssprache)
z. B.	zum Beispiel

Verzeichnis der Formelzeichen

AB_{Ist}	Ist-Abgang
AB_{Plan}	Plan-Abgang
A_{ij}	Anzahl der Wertepaare
$AktAVG$	Index des aktuellen Arbeitsvorgangs
A_m	mittlere Auslastung
$AnzAVG$	Anzahl der Arbeitsvorgänge des Auftrags
$a_{TT,k}$	termintreuebezogener Abgabefaktor von PM_k
BEL_m	mittlere Belastung
$BKAP_{v,ki}$	verfügbare Betriebsmittelkapazität von AS_i in PM_k
d_j	Jaccard-Distanz
f_{DZ}	Durchlaufzeitfaktor
f_{FG}	Freiheitsgradfaktor
f_{TT}	Termintreuefaktor
$h_{TT,k}$	termintreuebezogener Hilfsfaktor von PM_k
k_a	abgabebezogener Progressionsgrad
KAP_{ki}	Kapazität des Arbeitssystems AS_i in PM_k
$KAP_{rel,k}$	relative Modulkapazität von PM_k
$KAP_{rel,ki}(t)$	relative Kapazität des Arbeitssystems AS_i in PM_k zum Zeitpunkt t
k_v	verteilungsbezogener Progressionsgrad
L_m	mittlere Leistung
max	Maximum
MF_k	Mitarbeiterflexibilität von PM_k
min	Minimum
MK_k	Materialflussskomplexität von PM_k
MM	Modulmenge
MVW_{kl}	Modulvergleichswert von PM_k zu PM_l

Verzeichnis der Formelzeichen

P	Anzahl herzustellender Produkte bzw. Produktkomponenten
$PKAP_{v,ki}$	verfügbare Personalkapazität von AS_i in PM_k
PM_k	Produktionsmodul k
RS	Rückstand
$RS_{Grenz,k}$	Grensrückstand von PM_k
RS_k	Modulrückstand von PM_k
S	Schlupfzeit bzw. Schlupf
S_{DZ}	durchlaufzeitbezogene Schlupfzeit
$S_{DZ,k}$	durchlaufzeitbezogene Modulschlupfzeit von PM_k
S_{FG}	freiheitsgradbezogene Schlupfzeit
$S_{FG,k}$	freiheitsgradbezogene Modulschlupfzeit von PM_k
S_G	Gesamtschlupfzeit
S_{TT}	termintreuebezogene Schlupfzeit
$S_{TT,a}$	termintreuebezogene Abgabeschlupfzeit
$S_{TT,k}$	termintreuebezogene Modulschlupfzeit von PM_k
$S_{TT,Start}$	initiale termintreuebezogene Modulschlupfzeit
$S_{TT,v}$	termintreuebezogene Verteilschlupfzeit
t_A	Amortisationszeit
t_e	Eingriffszeit
t_r	Rüstzeit
TAE_{Plan}	Plan-Bearbeitungsende
TEP_{Ist}	Ereigniszeitpunkt
TP_0	Planungszeitpunkt
TT	Durchschnittstermintreue
TT_{ges}	Gesamtstermintreue
TT_k	Modulstermintreue von PM_k
$v_{DZ,k}$	durchlaufzeitbezogener Verteilungsfaktor von PM_k
$v_{FG,k}$	freiheitsgradbezogener Verteilungsfaktor von PM_k
$v_{TT,k}$	termintreuebezogener Verteilungsfaktor von PM_k

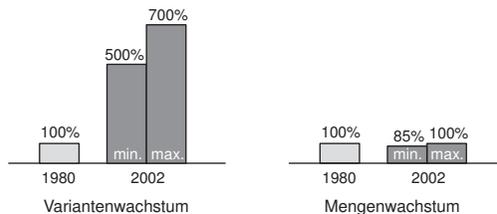
ZDF	Durchführungszeit
ZDL	Durchlaufzeit
ZL	Liegezeit
ZTR	Transportzeit
ZUE	Übergangszeit

1 Einleitung

1.1 Gegenwärtige Situation produzierender Unternehmen

Produzierende Unternehmen agieren heute in einem turbulenten Umfeld, dessen Einflüsse durch sogenannte Megatrends erklärt und beschrieben werden können. Unter diesen Megatrends werden mittel- bis langfristige Entwicklungen verstanden, aus denen globale, nachhaltige Konsequenzen für die produzierende Industrie mit einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit resultieren. Im Folgenden werden zur Beschreibung der gegenwärtigen Situation produzierender Unternehmen insbesondere Einflüsse und Abhängigkeiten diskutiert, welche unter den Megatrends *Globalisierung* sowie *Dynamisierung der Produktlebenszyklen* zusammengefasst werden können (WIENDAHL 2002, ABELE & REINHART 2011).

Das hohe Anspruchsniveau der Kunden an die nachgefragten Produkte hinsichtlich Individualität und Qualität (LINDEMANN et al. 2006) sowie die zunehmende Sättigung der Märkte, aus der ein Überangebot an Produkten resultiert (WESTKÄMPER 2006, BAUMBERGER 2007), haben zu einer grundlegenden Verschiebung der Marktcharakteristika geführt. Klassische, durch Verkäufer dominierte Massenmärkte, auf denen standardisierte Waren angeboten werden, sind weitestgehend durch Käufermärkte abgelöst, welche das Angebot von kundenindividuellen Produkten erfordern (REINHART & ZÄH 2003). Unternehmen, die auf diesen globalen Märkten gegenüber ihren internationalen Wettbewerbern bestehen möchten, sind gezwungen, ihr Leistungsangebot maßgeblich an den Wünschen der Kunden auszurichten und somit im Selbstverständnis eines Dienstleisters für den Kunden zu produzieren (RÖHRIG 2002, WESTKÄMPER 2006). Basierend auf diesen Trends lässt sich in den vergangenen Jahren ein signifikantes Variantenwachstum beobachten, wobei gleichzeitig die Anzahl der produzierten Einheiten konstant bzw. rückläufig ist (vgl. Abbildung 1) (WILDEMANN 2009).



Anzahl der befragten Unternehmen: 62

Abbildung 1: Entwicklung der Variantenvielfalt und der Stückzahlen
(WILDEMANN 2009)

1 Einleitung

Diese Tatsache belegt eine zunehmende Individualisierung der Produkte, für deren Herstellung gleichzeitig immer weniger standardisierte Komponenten eingesetzt werden können (ADAM 2001, LANZA & MOSER 2012). Mit steigender Varianz der Produkte geht somit eine zunehmende Produktkomplexität einher, welche beispielsweise durch neue Technologien und Funktionalitäten hervorgerufen wird (BIENIEK 2001, EVERSHEIM & SCHUH 2005, OSTGATHE 2012).

Die kundenindividuellen Produkte und die damit verbundenen kleinen Losgrößen sowie die zunehmende Anzahl an abzuwickelnden Produktionsaufträgen führen zu gesteigerten Aufwänden in der Auftragsabwicklung. Insbesondere die Planung, Steuerung und Ausführung von Produktionsabläufen erfordern einen erhöhten Bedarf an Information und Koordination (ADAM 2001, REICHWALD et al. 2006). Dies liegt in den strategischen Leistungszielen *Zeit*, *Qualität* und *Kosten* der Unternehmen begründet (WESTKÄMPER 2006). Daraus leitet sich die Anforderung nach einer möglichst effizienten und adäquaten Verteilung (z. B. hohe Maschinenauslastung, geringe Auftragsdurchlaufzeiten) der varianten Aufträge auf die zur Verfügung stehenden Ressourcen ab. Dabei ist sicherzustellen, dass alle relevanten Informationen (z. B. Arbeitspläne), Materialien (z. B. Bauteile) und Ressourcen (z. B. Maschinen) rechtzeitig und an der richtigen Stelle zur Verfügung stehen (FRANKE 2002). Die Freiheitsgrade (z. B. Vertauschen der Auftragsreihenfolge) verrichtungsbezogener Fertigungsprinzipien (z. B. Werkstattfertigung), welche häufig bei der Herstellung hochvarianter Produkte eingesetzt werden (BRINZER 2005, PILLER 2006), sowie die Berücksichtigung spezifischer Kundeninformationen in der Produktion (z. B. kurzfristige Kundenwünsche) (REICHWALD et al. 2006) steigern die Komplexität in der Auftragsabwicklung zusätzlich. Aus diesem Grund gelingt es nur selten, die Produktionsaufträge gemäß der ursprünglichen Produktionsplanung auszuführen (HEIDERICH 2001). Dies wird ebenfalls durch die Ergebnisse der Studie „Stellhebel für mehr Produktivität“ des Fraunhofer ISI bestätigt (LAY et al. 2009). Darin wird durch die Befragung von ca. 1600 produzierenden Unternehmen insbesondere eine starke Abhängigkeit zwischen der Produktivität eines Unternehmens und dessen Produktionstypen (Fertigungsprinzip, Fertigungsart etc.) identifiziert. (OSTGATHE 2012)

In der betrieblichen Praxis hat in den vergangenen Jahren das Leistungsziel *Zeit* im Vergleich zu den Zielen *Qualität* und *Kosten* stark an Relevanz und Wichtigkeit gewonnen. Zum einen erwarten Kunden, neben einem qualitativ hochwertigen Produkt, kurze Lieferzeiten und zum anderen insbesondere die pünktliche Auslieferung zum zugesagten Liefertermin (WIENDAHL et al. 2006, LANZA et al. 2013). Dabei hat der Wettbewerbsfaktor Liefertreue einen erheblichen Einfluss auf die Beziehung zwischen Kunden und Lieferanten und damit auf den langfristigen Erfolg eines Unternehmens (BEGEMANN 2005). Dennoch weisen produzierende Unternehmen häufig erhebliche Defizite hinsichtlich dieses Leistungsziels auf. Dabei werden unrealistische Liefertermine vereinbart und zu kurze Liefer-

zeiten versprochen, welche durch die steuernden und ausführenden Unternehmensbereiche nicht erreicht werden können. Eine Studie von SCHUH & WESTKÄMPER (2006) benennt für die planenden Bereiche produzierender Unternehmen ungenaue Stammdaten (z. B. zur Verfügung stehende Kapazitäten) als wesentliche Ursache für unrealistische Lieferterminzusagen. In den ausführenden Bereichen erfolgt, gerade im Bereich der hochvarianten Einzel- und Kleinserienfertigung, selten eine effektive Auftragssteuerung unter Berücksichtigung der aktuellen Produktionssituation. Die gesteigerte Komplexität und die Intransparenz über den aktuellen Auftragsfortschritt in der Produktion resultieren damit häufig in einer Nicht-Einhaltung zugesagter Lieferfristen. (OSTGATHE 2012)

Die wissenschaftliche Diskussion des Komplexitätsbegriffes im Produktionsumfeld unterscheidet zwischen statischer und dynamischer Komplexität. Die statische Komplexität leitet sich aus der *längerfristigen* Auslegung einer Produktionsumgebung mit fix definierten Maschinen und Anlagen ab (z. B. hohe Materialflusskomplexität). Die dynamische Komplexität resultiert im Gegenzug aus der *kurzfristigen* Veränderung von Produktionsstrukturen (z. B. Maschinenausfälle) sowie Material- und Informationsflüssen (z. B. Kundennachfrage und -anforderungen). Beide Komplexitätsmerkmale beeinträchtigen die Effektivität und Effizienz heutiger Ansätze zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) (WINDT et al. 2008, ELMARAGHY et al. 2012, BLUNCK & WINDT 2013). Unternehmen können diesem komplexen und turbulenten Umfeld immer weniger durch eine *Komplexitätsreduktion* der Produktionsabläufe, im Sinne einer homogenen Materialflussorientierung mit Standard-Durchlaufzeiten je Produkt, begegnen. Die Produktionsstrategien durchleben heute einen Wandel von standardisierten zu individualisierten Produktionsabläufen. Diese Individualisierung zeichnet sich durch Produktionsaufträge mit heterogenen Materialflüssen und hohen Durchlaufzeitstreuungen aus, welche eine *Komplexitätsbeherrschung* zwingend notwendig machen. Diese Komplexitätsbeherrschung muss durch eine individuelle Planung, Steuerung und Ausführung der Produktionsaufträge erfolgen, um den strategischen Leistungszielen *Zeit*, *Qualität* und *Kosten* gleichermaßen gerecht zu werden und im internationalen Wettbewerb langfristig bestehen zu können. (WIENDAHL 2002)

1.2 Motivation der Arbeit

Die Bedeutung der Produktionssteuerung zur Erreichung der logistischen Leistungsziele eines Unternehmens ist unbestritten. Durch die effiziente Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung kann unmittelbar Einfluss auf die Zielgrößen Termintreue, Durchlaufzeit, Auslastung und Bestand in der Produktion genommen und so der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Komplexität begegnet werden. (WIENDAHL 1997, SCHUH et al. 2007, ZAEH & OSTGATHE 2009)

1 Einleitung

Die erfolgreiche Ausführung der Produktionssteuerung hängt, gerade in der auftragsbezogenen Produktion, maßgeblich von rückgemeldeten Informationen zur aktuellen Produktionssituation ab (SCHUH et al. 2007, SCHUH et al. 2011). Eine aktuelle Studie des VDMA e. V., des FIR e. V. und des WZL der RWTH Aachen zeigt auf, dass ca. ein Drittel der 148 befragten produzierenden Unternehmen einen wesentlichen Mangel der PPS in der fehlenden Verfolgung des Auftragsfortschritts sehen. Nochmals 30,4 % benennen die Nutzung von Mittel- und Schätzwerten als Datengrundlage der PPS als weiteres Defizit. Die unzureichende Verarbeitung von Rückmeldedaten aus der Produktion wird darüber hinaus von mehr als einem Viertel der Befragten als Mangel empfunden. Sofern eine Rückmeldung erfolgt, wird dies bei ca. 60 % der Unternehmen manuell an der Maschine und damit ineffizient und fehleranfällig durchgeführt. Die für eine effiziente Generierung von Rückmeldedaten erforderlichen Systeme zur Betriebsdatenerfassung (BDE) sind laut dieser Studie lediglich bei ungefähr der Hälfte der befragten Unternehmen implementiert (SCHUH & STICH 2011). Eine Studie des Fraunhofer ISI stützt diese Aussagen und zeigt auf, dass BDE-Systeme zudem häufig als isolierte Insellösungen eingesetzt werden. Die rückgemeldeten Produktionsdaten werden bei 60 % der befragten Unternehmen ausschließlich zu statistischen Zwecken genutzt (BECKERT & HUDETZ 2002). Durch die fehlende Integration der BDE-Systeme in Systeme zur Produktionssteuerung besteht bei der Ausführung von Steuerungsaufgaben heute ein erhebliches Defizit bezüglich aktueller Informationen zum individuellen Produktzustand und Auftragsstatus (SCHUH & WESTKÄMPER 2006, KLUBMANN 2009, ZAEH et al. 2012). Somit ist eine Berücksichtigung der momentanen Produktionssituation bei Steuerungsentscheidungen, die zur logistischen Zielerreichung (z. B. Einhaltung der Termintreue) und zur Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse (z. B. Störungen) zu treffen sind, häufig nicht möglich. Dies motiviert eine Steigerung der Informationsqualität hinsichtlich Aktualität und Detailliertheit sowie die Reduzierung von Übermittlungszeiten von Produktionsdaten (HEIDERICH 2001, KLETTI 2006, LASSEN 2006), was ebenfalls durch die Studie des VDMA e. V., des FIR e. V. und des WZL der RWTH Aachen unterstrichen wird. Demnach wird von 37 % der befragten Unternehmen die Verarbeitung von Rückmeldedaten in Echtzeit als Maßnahme zur Behebung aktueller Defizite in der PPS vorgeschlagen und 70 % der Befragten halten dezentrale Ansätze in der PPS unter Verarbeitung von Echtzeit-Informationen als zukunftsweisend (SCHUH & STICH 2011).

In der *Durchdringung mit neuen Technologien*, welche ebenfalls als ein gegenwärtiger Megatrend bezeichnet wird, liegt eine große Chance zur Beherrschung der beschriebenen Komplexität (ABELE & REINHART 2011). Die Integration von modernen Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK-Technologien), wie beispielsweise RFID (Radio Frequency Identification), in das betriebliche Informationsmanagement ermöglicht eine Transparenzerhöhung in der Produkti-

on. Die konsequente und zielgerichtete Nutzung dieser aktuellen Produktionsdaten kann so einen erheblichen Beitrag für die Effizienzsteigerung der Produktionssteuerung leisten (MÄRTENS et al. 2007, SCHUH et al. 2007, ZAEH & OSTGATHE 2009, SCHUH et al. 2011, ENGELHARDT & REINHART 2012).

Heutige konventionelle Verfahren zur Steuerung von Produktionsabläufen arbeiten meist auf Basis von Vergangenheitsdaten. Sie sind nicht auf die Berücksichtigung von aktuellen Informationen aus der Produktion ausgelegt und gelangen bei der Bewältigung der beschriebenen Herausforderungen schnell an ihre Grenzen. Betriebsorganisatorische Maßnahmen (z. B. Produktionssegmentierung), die eine Komplexitätsbeherrschung begünstigen, werden zudem selten aus der Sicht der Produktionssteuerung umgesetzt (KURBEL 2005, ZAEH & OSTGATHE 2009, STÜRMANN 2012). Neben der Berücksichtigung der aktuellen Produktionssituation im Rahmen der Produktionssteuerung ist außerdem eine systematische Synchronisation der Produktionsabläufe entscheidend, um Umlauf- bzw. Pufferbestände zu reduzieren und Störungen im Produktionsablauf aufgrund von fehlendem Material zu vermeiden. Gerade in Unternehmen der Einzel- und Kleinserienproduktion sind solche Ansätze nicht oder nur unzureichend implementiert. Der Grund hierfür sind vor allem fehlende Konzepte zur Synchronisation der Fertigungsprozesse mit der Montage (horizontale Synchronisation) sowie der Fertigungsprozesse untereinander (vertikale Synchronisation). Dadurch verstreicht heute ein erhebliches Steuerungspotenzial zur verbesserten Erreichung der logistischen Zielgrößen und somit der Leistungsziele des Unternehmens. (LÖDDING 2008, STÜRMANN 2012)

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Die gegenwärtige Situation produzierender Unternehmen sowie die dargestellte Motivation der vorliegenden Arbeit haben verdeutlicht, dass insbesondere in der auftragsbezogenen Produktion eine erhöhte Komplexität in der Planung, Steuerung und Ausführung von Produktionsabläufen beherrscht werden muss. Hierbei kommt der Produktionssteuerung eine wichtige Bedeutung zu, da durch sie ein großer Teil des Koordinationsaufwandes zur logistischen Zielerreichung in der variantenreichen Produktion getragen werden kann.

Als vielversprechender Ansatz zur Beherrschung dieser dynamischen Komplexität und zur Effizienzsteigerung der Produktionssteuerung hinsichtlich der logistischen Zielgrößen erfolgt im Rahmen dieser Arbeit die Verwendung des Produktes als zusätzliches Element bei der Steuerung von Produktionsabläufen. Durch die Nutzung moderner IuK-Technologien und deren konsequente Integration in bestehende Systeme zur Produktionssteuerung lässt sich eine Parallelisierung und Synchronisation von Material- und Informationsflüssen in der Produktion realisieren. Die Möglichkeit der dezentralen Speicherung von Daten am Produkt

1 Einleitung

ermöglicht zudem eine effiziente Integration aktueller auftrags- und produktspezifischer Informationen (z. B. Qualitätsdaten, Liefertermine) in Produktionsprozesse und Steuerungsentscheidungen. Darüber hinaus motiviert die zunehmende Individualisierung der Produktionsabläufe mit teilweise konkurrierenden logistischen Zielgrößen (z. B. an Engpass-Arbeitssystemen) eine *steuerungsorientierte* Modularisierung der Produktion zur Beherrschung der steigenden Steuerungskomplexität im Rahmen der Betriebsorganisation.

Das Gesamtziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Systems für die situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage unter Einsatz der RFID-Technologie. Dieses System soll die logistische Zielerreichung sicherstellen und einen Beitrag zur Komplexitätsbeherrschung bei der Steuerung von Produktionsabläufen hochvarianter Produkte leisten. Dabei wird bei der Ausführung der Steuerungsverfahren die aktuelle Situation freigegebener Produktionsaufträge berücksichtigt. Diese sogenannte Auftragsituation stellt sich durch aktuelle Informationen zum Auftragsstatus (z. B. Grad der Fertigstellung) und Produktzustand (z. B. geometrisches Maß) dar und soll unter Einsatz eines RFID-basierten Informationsmanagements stets zur Verfügung gestellt werden. Als betriebsorganisatorische Grundlage der situationsbasierten Produktionssteuerung muss als Bestandteil des Systems ein Vorgehen für die steuerungorientierte Produktionsmodularisierung erarbeitet werden. Zur Erreichung dieses Gesamtziels sind, wie in Abbildung 2 dargestellt, somit die drei Systemelemente steuerungorientierte Produktionsmodularisierung, RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement und situationsbasierte Steuerungsverfahren zu betrachten.



Abbildung 2: Zielsetzung und Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit

Für das Vorgehen zur *steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung* müssen, unter Berücksichtigung der in einem Unternehmen vorliegenden Produktionstypen, Prinzipien erarbeitet werden, die eine Modulbildung aus Sicht der

Produktionssteuerung ermöglichen. Diese *Modularisierungsprinzipien* dienen dem Anwender zur logischen Zusammenfassung von einzelnen Arbeitssystemen zu sogenannten Produktionsmodulen, um die Komplexität der Produktionssteuerung zu beherrschen. Als betriebsorganisatorische Grundlage ermöglicht diese steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung im nächsten Schritt die Implementierung des notwendigen Informationsmanagements und damit die Ausführung situationsbasierter Steuerungsverfahren.

Das *RFID-basierte hybride Informationsmanagement* umfasst im Wesentlichen eine Referenzarchitektur, die die Steuerungselemente (z. B. Steuerungssystem, intelligentes Produkt) sowie deren Organisationsstruktur und Kommunikation in der steuerungsorientiert modularisierten Produktion formal beschreibt. Darüber hinaus müssen die Daten und Datenstrukturen, welche für einen echtzeitnahen, betriebsparallelen Austausch von Informationen zur aktuellen Auftragsituation notwendig sind, festgelegt und die Steuerungspotenziale für eine situationsbasierte Produktionssteuerung aufgezeigt werden.

Unter Berücksichtigung dieser Steuerungspotenziale gilt es, situationsbasierte Verfahren für die Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung (Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung etc.) zu erarbeiten. Dabei ist es in einem ersten Schritt sinnvoll, bestehende *konventionelle Steuerungsverfahren* (z. B. Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA)) hinsichtlich ihrer situationsbasierten Ausführbarkeit zu analysieren. Hierbei soll geprüft werden, inwiefern diese Verfahren bei der Ausführung die aktuelle Auftragsituation berücksichtigen können und wie die Steuerungskomplexität mit Hilfe der Referenzarchitektur beherrscht werden kann. Darauf aufbauend erfolgt eine etwaige Adaption dieser Verfahren gemäß den Anforderungen an eine zeitgemäße Produktionssteuerung. Im nächsten Schritt werden *systemspezifische Steuerungsverfahren* (z. B. intermodulare Schlupfzeitverteilung) entwickelt, die unter Berücksichtigung aktueller Produktionsdaten inter- und intramodular eingesetzt werden und dabei direkten Einfluss auf die logistischen Zielgrößen haben. Diese systemspezifischen Verfahren bilden in Kombination mit den konventionellen Steuerungsverfahren die strukturierte Verfahrensbasis des Systems, die eine ganzheitliche, situationsbasierte Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung erlaubt und sicherstellt.

1.4 Aufbau der Arbeit

Um die im vorigen Abschnitt definierten Ziele zu erreichen, wurde für diese Arbeit eine Struktur gewählt, die zehn inhaltliche Kapitel umfasst (vgl. Abbildung 3). Nach der einführenden Erläuterung der gegenwärtigen Situation produzierender Unternehmen, der Motivation und der daraus abgeleiteten Zielsetzung erfolgt in *Kapitel 2* die Darstellung der relevanten Grundlagen für die Steuerung von Produktionsabläufen. Aufbauend auf den Grundlagen werden im *Kapitel 3*

1 Einleitung

die allgemeinen Anforderungen an eine zeitgemäße Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage formuliert. Die Darstellung des für die vorliegende Arbeit relevanten Standes der Forschung und Technik und die Ableitung des Handlungsbedarfs erfolgen im *Kapitel 4*.

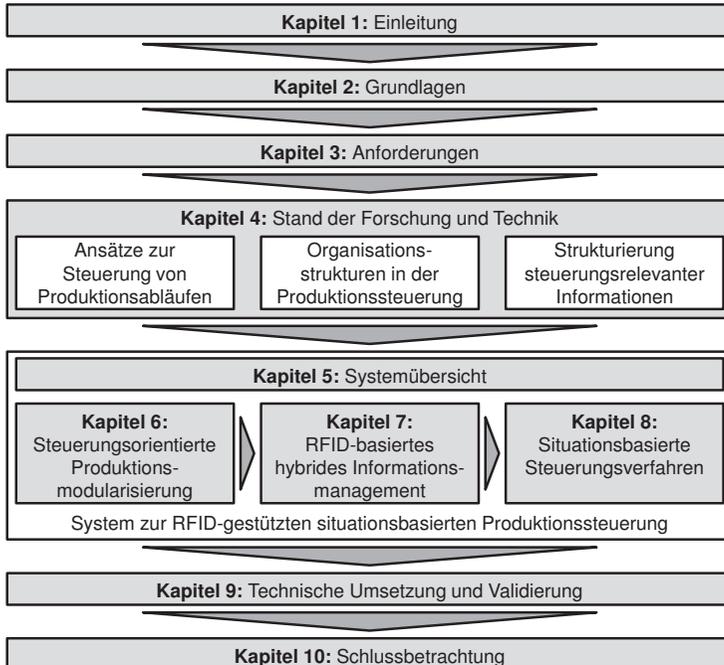


Abbildung 3: Aufbau der vorliegenden Arbeit

Die definierten Anforderungen und die Ergebnisse des Standes der Forschung und Technik legen die Grundlage für die Entwicklung der Teilelemente des Systems in den Kapiteln 5 bis 8. In *Kapitel 5* erfolgt die übersichtliche Vorstellung dieser Systemelemente und deren Zusammenspiel, bevor in *Kapitel 6* ein Vorgehen zur steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung entwickelt wird. Aufbauend auf diesem Modularisierungsvorgehen erfolgt in *Kapitel 7* die Erarbeitung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements. Die Entwicklung von Steuerungsverfahren, die die aktuelle Auftragsituation freigegebener Produktionsaufträge berücksichtigen, wird in *Kapitel 8* vorgenommen. Das *Kapitel 9* dient der Darstellung der technischen Umsetzung und Validierung des entwickelten Systems. Den Abschluss der Arbeit bildet *Kapitel 10*, in welchem die erzielten Ergebnisse zusammengefasst werden. Zudem erfolgt ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen der situationsbasierten Steuerung von Produktionsabläufen und des RFID-basierten Informationsmanagements.

2 Grundlagen

2.1 Übersicht

Aufbauend auf der dargestellten Ausgangssituation und Motivation der vorliegenden Arbeit sowie der formulierten Zielsetzung erfolgt in diesem Kapitel eine Einführung in die in diesem Kontext notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen. Hierfür werden in Abschnitt 2.2 die Produktionstypen vorgestellt und anhand derer eine Einordnung der situationsbasierten Steuerung von Produktionsabläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage vorgenommen. Im Anschluss daran (vgl. Abschnitt 2.3) werden die Grundlagen der PPS erläutert und die zugehörigen Aufgaben und logistischen Zielgrößen detailliert. Abschließend erfolgen in Abschnitt 2.4 eine grundlegende Definition des Informationsmanagements in der Produktion und eine Einführung in die heute verfügbaren IuK-Technologien für die Produktionssteuerung. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird der Fokus dabei auf die RFID-Technologie gerichtet.

2.2 Produktionstypen

2.2.1 Allgemeines

Unter einem Produktionstyp wird die Klassifikation und Charakterisierung einer Produktionsumgebung nach verschiedenen Kriterien verstanden (WOLL 2008). In diesem Abschnitt erfolgt die Darstellung von Kriterien, die für die Steuerung von Produktionsabläufen relevant sind. Aus diesem Grund werden diese Kriterien auch als *steuerungsrelevante Produktionsmerkmale* bezeichnet (LÖDDING 2008).

2.2.2 Fertigungsarten

Die Klassifikation einer Produktion nach der durchschnittlichen Auflagenhöhe (Losgröße) und der Wiederholhäufigkeit einer Produkterstellung bestimmt die Fertigungsart eines Produktionstyps. Dabei kann zwischen vier Fertigungsarten unterschieden werden. Bei der *kundenspezifischen Einmalfertigung* liegen in der Regel eine geringe Auflagenhöhe (kleine Losgrößen) und keine Wiederholung der Produkterstellung vor. Eine geringe Wiederholhäufigkeit und auch Auflagenhöhe weist die *Einzel- und Kleinserienfertigung* auf. Bei der *Serienfertigung* werden demgegenüber höhere Auflagenhöhen und Wiederholhäufigkeiten erreicht. Sehr hohe Auflagen und Wiederholhäufigkeiten liegen bei der *Massenfer-*

tigung von Standardprodukten vor. Diese Fertigungsart wird vor allem im Bereich der kundenanonymen Lagerfertigung eingesetzt und verliert aus dem Grund einer immer höheren Variantenvielfalt zunehmend an Bedeutung. Individualisierungskonzepte, wie beispielsweise die kundenindividuelle Massenfertigung (Mass Customization), versuchen dabei die Kostenvorteile der Massenfertigung mit der Flexibilität bei der Einzel- und Kleinserienfertigung zu verknüpfen (HELLMICH 2003, SCHUH & SCHMIDT 2006, PILLER 2006, LÖDDING 2008).

Bei den Fertigungsarten Einzel- und Kleinserienfertigung sowie der hochvarianten Serienfertigung lässt sich während des mehrstufigen, arbeitsteiligen Herstellungsprozesses ein eindeutiger Kundenauftrag zum Werkstück zuordnen. Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit sind diese Fertigungsarten für die Entwicklung eines Systems zur situationsbasierten Produktionssteuerung in der *auftragsbezogenen* Fertigung und Montage besonders relevant.

2.2.3 Fertigungsprinzipien

Neben den Fertigungsarten beeinflussen auch die Fertigungsprinzipien die Material- und Informationsflüsse im Unternehmen und sind aus diesem Grund ebenfalls als steuerungsrelevantes Produktionsmerkmal zu berücksichtigen. Unter einem Fertigungsprinzip wird die Organisationsform (z. B. Anordnung von Maschinen) einer Produktionsumgebung verstanden und es besteht ein enger Zusammenhang zur vorliegenden Fertigungsart. In der *Werkstattfertigung*, die nach dem Verrichtungsprinzip organisiert ist, werden gleichartige Produktionsressourcen (z. B. Drehmaschinen) räumlich zu einer Werkstatt zusammengefasst. Das Gegenstück zur Werkstattfertigung bildet die *Fließfertigung*, in der Produktionsressourcen objektbezogen entlang des Materialflusses der zu produzierenden Varianten angeordnet werden. Die *Inselfertigung* ist zwischen der Werkstatt- und der Fließfertigung anzuordnen und versucht, die Vorteile der beiden Fertigungsprinzipien mit Hilfe einer Produktionssegmentierung zu vereinen. Dabei werden sogenannte Produktfamilien mit ähnlichen Strukturen jeweils einer Produktionsinsel zugeordnet. Das *Werkbankprinzip* ist insbesondere für komplexe Montagetätigkeiten relevant, für die handliche Maschinen benötigt werden und deren Aufteilung auf mehrere Arbeitssysteme unwirtschaftlich wäre. Hierbei wird das Werkstück von einem Mitarbeiter auf einer Werkbank häufig komplett bearbeitet, wodurch Transportzeiten vollständig entfallen und vergleichsweise kurze Durchlaufzeiten realisiert werden können (SCHRAFT et al. 1996, SCHUH & SCHMIDT 2006, LÖDDING 2008, MATHAR & SCHEURING 2009, HELBING 2010, WIENDAHL 2010).

Die auftragsbezogene Fertigung und Montage erfolgt in der Industrie in der Regel nach einem der vier dargestellten Fertigungsprinzipien, welche direkten Einfluss auf die logistische Zielerreichung der Produktionssteuerung haben. Aus

Gründen der Vollständigkeit sei an dieser Stelle ebenfalls auf das Fertigungsprinzip *Baustellenfertigung* verwiesen, das jedoch aufgrund seines Charakters andere Anforderungen an die Produktionssteuerung aufweist und somit nicht im Fokus bei der Entwicklung des Steuerungssystems im Rahmen dieser Arbeit steht.

2.2.4 Teilefluss

Unter dem Produktionsmerkmal Teilefluss versteht man die Art, wie Produkte während ihres Herstellungsprozesses zwischen zwei im Arbeitsplan aufeinanderfolgenden Arbeitssystemen transportiert werden (LÖDDING 2008). Ein *Arbeitssystem*, als Teil eines Produktionssystems, stellt hierbei die kleinste, selbstständig arbeitsfähige Einheit dar, in welcher jeweils ein einzelner Arbeitsvorgang ausgeführt werden kann (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2009). Der Teilefluss nimmt erheblichen Einfluss auf die Bestände und die Durchlaufzeiten der Produktion und muss daher bei der Auslegung der Produktionssteuerung berücksichtigt werden. Der *losweise Transport* findet in der auftragsbezogenen Produktion sehr häufig Anwendung. Dabei wird das Auftragslos erst zum nächsten Arbeitssystem transportiert, wenn alle zu produzierenden Werkstücke dieses Loses an dem aktuellen Arbeitssystem vollständig bearbeitet sind. Der logistische Idealfall mit minimalen Durchlaufzeiten und Beständen kann mit Hilfe des sogenannten *One-Piece-Flows* realisiert werden. Zwischen dem losweisen Transport und dem One-Piece-Flow hat sich als Kompromiss zur Verbesserung der logistischen Zielerreichung die *überlappede Fertigung* angesiedelt. Der logistisch ungünstigste Teilefluss ist die *Chargenfertigung*, bei der mehrere Lose aus Effizienz- und Prozessgründen (z. B. Ofenprozesse) gemeinsam bearbeitet werden müssen. (LÖDDING 2008).

2.2.5 Materialflusskomplexität und Variantenanzahl

In Abschnitt 1.1 wurde bereits der Einfluss steigender Variantenanzahlen auf die Auftragsabwicklung und insbesondere die Produktionssteuerung dargestellt. Zwischen den Produktionsmerkmalen Variantenanzahl und Komplexität des Materialflusses besteht ein enger Zusammenhang. Die Komplexität eines Materialflusses lässt sich durch die Anzahl der möglichen Vorgänger und Nachfolger eines Arbeitssystems und die Anzahl an Rückflüssen im Gesamtsystem charakterisieren, die mit steigender Variantenanzahl zunehmen. Folglich weist eine Werkstattfertigung eine wesentlich höhere Materialflusskomplexität als eine Fließfertigung auf. Die Materialflusskomplexität beeinflusst ebenfalls die Wahl des passenden Teileflusses. Während bei wenig komplexen Materialflüssen das One-Piece-Flow-Prinzip eingesetzt werden kann, machen komplexe Materialflüsse losweise Transporte aus Effizienzgründen erforderlich. In jedem Fall ist

auch bei hoher Variantenzahl eine möglichst geringe Materialflusskomplexität durch möglichst einheitliche Produktionsabläufe anzustreben (LÖDDING 2008).

2.2.6 Kapazitäts- und Belastungsflexibilität

Produzierende Unternehmen stehen heute in der Regel einer schwankenden Kundennachfrage gegenüber. Damit geht ein ungleichmäßiger Bedarf an Kapazitäten in der Produktion einher (ABELE & REINHART 2011). Die *Kapazitätsflexibilität* ist dabei die Fähigkeit eines Unternehmens, seine Kapazitäten schnell an die schwankenden Bedarfe anzupassen, beispielsweise durch die Einführung von Zusatzschichten im Falle eines hohen Kapazitätsbedarfs. Demgegenüber beschreibt die *Belastungsflexibilität* die Fähigkeit, die vorliegende Belastung an die verfügbaren Kapazitäten anzupassen. Hierzu zählt z. B. die Fremdvergabe von Produktionsaufträgen oder die Ablehnung eines Kundenauftrags im Falle voll ausgelasteter Ressourcen. Sowohl die Kapazitäts- als auch die Belastungsflexibilität haben als steuerungsrelevante Produktionsmerkmale einen erheblichen Einfluss auf die Kapazitätssteuerung, welche einen wesentlichen Teil des Aufgabenspektrums der Produktionssteuerung darstellt (LÖDDING 2008).

2.3 Produktionsplanung und -steuerung

2.3.1 Allgemeines

Damit produzierende Unternehmen in ihrer gegenwärtigen Situation (vgl. Abschnitt 1.1) bestehen können, ist es entscheidend, funktional überlegene Produkte zu wettbewerbsfähigen Preisen anzubieten. In der Vergangenheit stand bei der Herstellung der Produkte eine möglichst hohe Auslastung der Ressourcen zur Vermeidung von Stillstandskosten im Vordergrund, während heute geringe Durchlaufzeiten und Bestände sowie vor allem eine hohe Termintreue angestrebt werden (LÖDDING 2008). Bei der Beherrschung der Abläufe in der Fertigung und Montage sowie der Durchsetzung von Planungsvorgaben aus Konstruktion und Arbeitsvorbereitung kommt Systemen zur PPS eine wesentliche Bedeutung zu (WIENDAHL 2010). Die Teilaufgaben der PPS leisten unter den turbulenten Bedingungen des heutigen Marktumfeldes einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der logistischen sowie wirtschaftlichen Leistungsziele (WIENDAHL 1997, OSTGATHE 2012). Zur klaren Abgrenzung der Begriffe *Produktionsplanung* und *Produktionssteuerung* erfolgt im Rahmen dieser Arbeit eine Orientierung an den Definitionen des VDI (1992, S. 167):

Produktionsplanung: „Systematisches Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegung des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele.“

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

Der Anwendungsbereich der PPS erstreckt sich auf alle Fertigungsverfahren, die sich laut DIN 8580 in sechs Hauptgruppen untergliedern lassen (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 2003). Aufbauend auf diesem Verständnis erfolgt in der vorliegenden Arbeit die synonyme Verwendung der Begriffe *Fertigungssteuerung* und *Produktionssteuerung*. Darüber hinaus bezieht sich jedoch der Begriff *Produktion* allgemein auf alle sechs Hauptgruppen, während der Begriff *Montage* insbesondere dann verwendet wird, wenn die Abläufe fügender Fertigungsverfahren spezifisch adressiert werden sollen. In Abgrenzung dazu fokussiert der Terminus *Fertigung* vor allem auf die urformenden, umformenden und trennenden Fertigungsverfahren sowie das Beschichten und das Ändern der Stoffeigenschaften.

2.3.2 Logistische Zielgrößen

Übergeordnetes Ziel der PPS ist die möglichst effiziente und wirtschaftliche Erreichung der logistischen Leistungsziele im Unternehmen. Das Zielsystem der PPS basiert dabei auf der Logistikleistung und den Logistikkosten (vgl. Abbildung 4) (NYHUIS & SCHMIDT 2008).

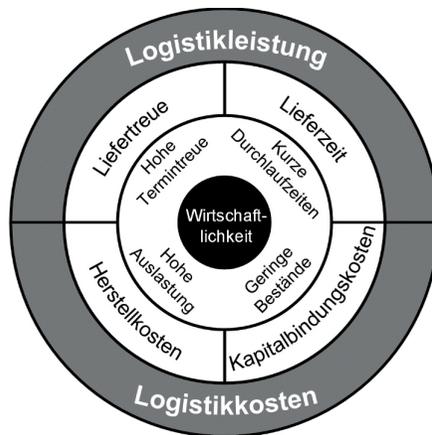


Abbildung 4: Zielsystem der PPS (WIENDAHL 2010)

Die extern vom Markt wahrnehmbare *Logistikleistung* setzt sich dabei aus der *Liefertreue* und der *Lieferzeit* eines Unternehmens zusammen. Diese bedingen eine hohe Termintreue der Produktionsabläufe und kurze Durchlaufzeiten. Die *Logistikkosten* umfassen unternehmensinterne *Kapitalbindungskosten* und *Her-*

2 Grundlagen

stellkosten. Eine Reduzierung der Logistikkosten durch die Kapitalbindungskosten erfordert die Bestandssenkung von Rohmaterialien, Halbfertigzeugen bzw. Fertigzeugen. Die Herstellkosten können hinsichtlich der Logistikkosten maßgeblich durch eine hohe Auslastung der Ressourcen (v. a. Maschinen und Anlagen) positiv beeinflusst werden (WIENDAHL 2010, OSTGATHE 2012).

Um dem Kunden mit einer möglichst hohen Logistikleistung gerecht zu werden und dennoch den unternehmensinternen Forderungen nach geringen Logistikkosten nachkommen zu können, stehen produzierende Unternehmen vor einem Zielkonflikt bei der Optimierung der logistischen Zielgrößen. Dieser Konflikt ergibt sich aus dem gegenläufigen Charakter von Auslastung, Durchlaufzeit, Termintreue und Bestand und wird auch als *Dilemma der Ablaufplanung* bezeichnet. (GUTENBERG 1976, WIENDAHL 2010). Eine hohe und gleichmäßige Auslastung der Produktionsressourcen erfolgt durch eine gewährleistete Materialversorgung, welche maßgeblich durch hohe Umlaufbestände gesichert werden kann. Ein hohes Bestandsniveau resultiert jedoch in hohen Durchlaufzeiten und damit in der Gefahr, Kundentermine nicht termintreu einhalten zu können (WIENDAHL 2010). Unternehmen stehen somit vor der Herausforderung ein geeignetes Gleichgewicht zwischen den vier logistischen Zielgrößen zu finden (NYHUIS & SCHMIDT 2008). Diese sogenannte *logistische Positionierung* ist eine der wesentlichen Aufgaben der PPS und hängt von den individuellen Produktionstypen (vgl. Abschnitt 2.2) eines Unternehmens ab. Beispielsweise spielt in der auftragsbezogenen Produktion die Termintreue und Durchlaufzeit eine wichtigere Rolle als in der kundenanonymen Lagerfertigung (NYHUIS & WIENDAHL 2003, WIENDAHL 2010, OSTGATHE 2012).

Die vier logistischen Zielgrößen haben für die Erreichung der strategischen Leistungsziele eines Unternehmens eine hohe Bedeutung. Aus diesem Grund sind diese Zielgrößen bei der Entwicklung und insbesondere bei der späteren Bewertung des Systems zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung relevant.

Der *Bestand* innerhalb der Produktion besteht aus allen freigegebenen und noch nicht fertiggestellten Produktionsaufträgen und wird aus diesem Grund auch als Umlaufbestand (engl. Work In Process (WIP)) bezeichnet. Der Umlaufbestand ist als Abgrenzung zum Lagerbestand zu betrachten, der sich aus Rohmaterialien, Halbfertigzeugen und Fertigzeugen zusammensetzt. Im Rahmen der Produktionssteuerung wird der Umlaufbestand entweder mit der Anzahl an Produktionsaufträgen, Bauteilen oder mit Hilfe der Vorgabezeit der Auftragsdurchführung beziffert (LÖDDING 2008, OSTGATHE 2012). Für die situationsbasierte Produktionssteuerung ist im weiteren Verlauf der Arbeit der Umlaufbestand besonders relevant, da durch diese Regelgröße direkter Einfluss auf die Auslastung, Durchlaufzeit und Termintreue genommen werden kann.

Die *Auslastung* beschreibt als logistische Zielgröße das Verhältnis von tatsächlicher und maximal möglicher Leistung eines Arbeitssystems und somit die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Arbeitssystem mit ausreichend Arbeit versorgt ist (LÖDDING 2008). Die maximal mögliche Leistung eines Arbeitssystems kann vereinfacht durch das Minimum der verfügbaren Betriebsmittelkapazität und der nutzbaren Personalkapazität in Stunden oder Aufträgen pro Betriebskalendertag, den sogenannten restriktiven Kapazitätsfaktor, beschrieben werden (NYHUIS & WIENDAHL 2003). Produzierende Unternehmen streben in der Regel eine hohe Auslastung der Produktionsressourcen an, da dann die jeweiligen Investitions- und Betriebskosten auf eine größere Anzahl an Aufträgen verteilt werden und somit die Herstellkosten eines Einzelproduktes verringert werden können. Da eine hohe Auslastung gleichzeitig negativen Einfluss auf den Bestand, die Durchlaufzeit und die Termintreue hat, verliert diese logistische Zielgröße in der auftragsbezogenen Produktion jedoch immer mehr an Bedeutung (LÖDDING 2008).

Die *Durchlaufzeit* eines Produktionsauftrags bezeichnet die Zeitdauer von der Auftragsfreigabe bis zu dessen Fertigstellung. In der Fertigung und Montage stellt diese Zielgröße die Untergrenze für die Lieferzeit dar und beeinflusst durch ihre Streuung maßgeblich die Termin- und Liefertreue eines Auftrags (LÖDDING 2008). Sie lässt sich durch die Summe der Durchlaufzeiten (ZDL), welche für die Arbeitsvorgänge an den einzelnen Arbeitssystemen erforderlich sind, errechnen.

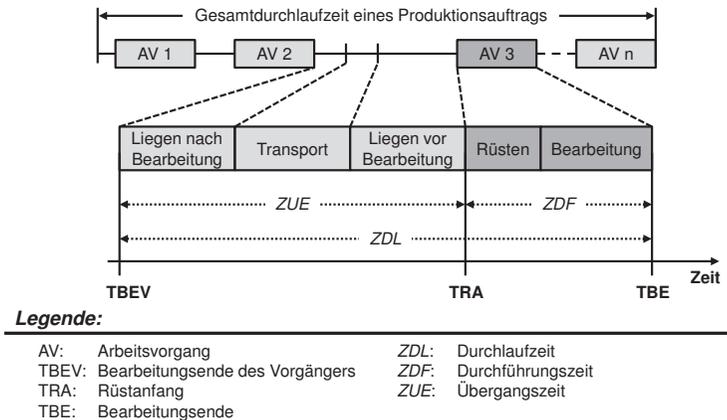


Abbildung 5: Arbeitsvorgangsbezogene Elemente der Durchlaufzeit (WIENDAHL 2010)

Die arbeitsvorgangsbezogene Durchlaufzeit bezeichnet die Zeitdauer vom Bearbeitungsende am vorherigen (im Falle des ersten Arbeitsvorgangs ist dies die Auftragsfreigabe) bis zum Abschluss des Arbeitsvorgangs an dem betrachteten Arbeitssystem. Sie lässt sich in die Übergangszeit (ZUE) und die Durchführungszeit (ZDF) untergliedern. Die Übergangszeit umfasst dabei die Transportzeit

(ZTR) zwischen zwei Arbeitssystemen und die Liegezeiten (ZL) vor und nach der Bearbeitung. In der Durchführungszeit ist der zeitliche Aufwand für das Rüsten des Arbeitssystems sowie die Bearbeitung des entsprechenden Auftrags zusammengefasst (vgl. Abbildung 5) (NYHUIS & WIENDAHL 2003). Mit Hilfe des Einflusses der Produktionssteuerung auf den Umlaufbestand lässt sich eine Reduzierung der Auftragsdurchlaufzeit erzielen, was jedoch eine geringere Auslastung von Produktionsressourcen zur Folge haben kann (LÖDDING 2008).

Die *Terminreue* bezeichnet den prozentualen Anteil der rechtzeitig fertiggestellten Aufträge an allen abgeschlossen Aufträgen innerhalb eines definierten Betrachtungszeitraumes. Dabei dient der Plan-Endtermin bzw. ein definierter Toleranzbereich um den Plan-Endtermin als Bewertungsgrundlage der Terminreue. Liegt der Fertigstellungszeitpunkt eines Auftrags innerhalb dieses Toleranzbereiches, wird dieser Auftrag als terminreu bezeichnet (YU 2001, BEGEMANN 2005). Eine Terminabweichung resultiert aus der Abweichung des Ist-Auftragsdurchlaufs vom Plan-Auftragsdurchlauf, wobei diese Abweichung in der Praxis anhand des Abgangs eines Auftrags aus der Produktion und nur selten mit Hilfe des Zugangs bzw. der Auftragsdurchlaufzeit gemessen wird (BEGEMANN 2005). Aufgrund der direkten Auswirkung der Terminreue auf die Liefertreue und damit auf die vom Kunden wahrnehmbare Logistikleistung spielt diese logistische Zielgröße eine immer wichtigere Rolle und muss bei der Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung besonders betrachtet werden. (LÖDDING 2008, OSTGATHE 2012)

2.3.3 Grundlagen der Produktionsplanung

Aufbauend auf den Begriffsdefinitionen in Abschnitt 2.3.1 „beplant“ die Produktionsplanung in regelmäßigen Abständen die Fertigung und Montage für die nächsten Perioden, wodurch die Eingangsgrößen der Produktionssteuerung festgelegt werden (WIENDAHL 2010). Im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit werden im Folgenden die Aufgaben der Produktionsplanung anhand des sogenannten Aachener PPS-Modells beschrieben.

Die in Abbildung 6 dargestellte Aufgabensicht des Aachener PPS-Modells unterteilt die PPS in vier Kernaufgaben, jeweils drei Netzwerk- und Querschnittsaufgaben sowie die übergeordnete Datenverwaltung (SCHUH & GIERTH 2006). Die Netzwerk- und Querschnittsaufgaben sowie die Kernaufgabe Fremdbezugsplanung und -steuerung spielen im Hinblick auf die Entwicklung eines Systems für die situationsbasierte Produktionssteuerung eine untergeordnete Rolle und werden daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter detailliert. Die Eigenfertigungssteuerung, im Sinne der Produktionssteuerung, wird in Abschnitt 2.3.4 behandelt. Eine Vertiefung der Datenverwaltung bzw. des Informationsmanagements erfolgt im Abschnitt 2.4.

Netzwerkaufgaben	Kernaufgaben	Querschnittsaufgaben		
Netzwerk- konfiguration	Produktionsprogrammplanung	Auftragsmanagement	Bestandsmanagement	Controlling
Netzwerk- absatzplanung	Produktionsbedarfsplanung			
Netzwerk- bedarfsplanung	Fremdbezugs- planung u. -steuerung			
Datenverwaltung				

Abbildung 6: Aufgaben der PPS (Aachener PPS-Modell)
(SCHUH & GIERTH 2006)

Die Kernaufgabe *Produktionsprogrammplanung* bestimmt das Produktionsprogramm basierend auf dem mittel- bis langfristigen Absatzplan des Unternehmens und bildet damit den Ausgangspunkt der Produktionsplanung. Dabei werden für einen bestimmten Planungshorizont die herzustellenden Produkte (Primärbedarf) nach Art, Menge und Termin periodisch festgelegt. Im Rahmen der Kernaufgabe *Produktionsbedarfsplanung* werden auf Basis des Produktionsprogramms der notwendige Material- und Ressourcenbedarf hergeleitet. Aus dem Primärbedarf folgt die Produktionsbedarfsplanung den Bedarf an Teilen und Komponenten (Sekundärbedarf) und erstellt Produktionsaufträge mit Plan-Endterminen. Die Kernaufgabe *Eigenfertigungsplanung* lässt sich in die Hauptaufgaben Losgrößenrechnung, Feinterminierung, Reihenfolgeplanung sowie Verfügbarkeitsprüfung untergliedern (SCHUH & ROESGEN 2006).

Im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit wurde die Produktionsplanung nur vergleichsweise knapp dargestellt. Der interessierte Leser sei daher an dieser Stelle auf die weiterführende Literatur, wie z. B. HACKSTEIN (1984), KURBEL (2005), SCHUH (2006) und LÖDDING (2008) verwiesen.

2.3.4 Grundlagen der Produktionssteuerung

Die Produktionssteuerung kann als Schnittstelle zwischen den planenden und den ausführenden Bereichen eines produzierenden Unternehmens betrachtet werden (PRITSCHOW et al. 1996). Ihre Aufgabe ist es, die Vorgaben und Ergebnisse der Produktionsplanung trotz unvermeidlicher Änderungen hinsichtlich Auftragsmenge und -termin sowie Störungen (z. B. Maschinen- oder Personalausfälle) durchzusetzen (WIENDAHL 1997, SCHUH & ROESGEN 2006). Aus diesem Grund leistet die Produktionssteuerung einen erheblichen Beitrag zur Erreichung der logistischen Zielgrößen (NYHUIS et al. 2006). Zur Beschreibung der Wirkzusammenhänge in der Produktionssteuerung wurde von LÖDDING (2008) ein ver-

2 Grundlagen

fahrensneutrales Modell entwickelt (vgl. Abbildung 7), welches zum einen die Aufgaben der Produktionssteuerung und zum anderen deren Einfluss auf die logistischen Zielgrößen beschreibt.

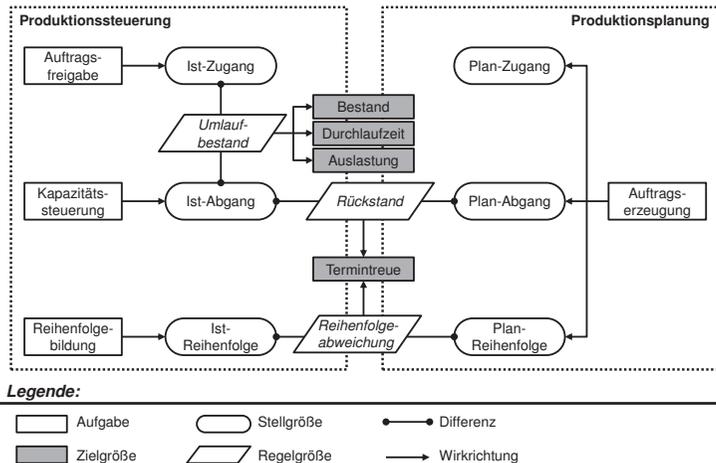


Abbildung 7: Modell der Fertigungssteuerung (LÖDDING 2008, OSTGATHE 2012)

Das Modell der Fertigungssteuerung setzt sich aus den vier Elementen Stell-, Regel- und Zielgrößen sowie den Aufgaben der PPS zusammen, die zur Darstellung der jeweiligen Wirkzusammenhänge miteinander verknüpft sind. Für das Modell gilt dabei (LÖDDING 2008, OSTGATHE 2012):

- Die vier Aufgaben legen die Stellgrößen der Fertigungssteuerung fest.
- Die Regelgrößen resultieren aus der Abweichung zweier Stellgrößen.
- Die logistischen Zielgrößen werden durch die Regelgrößen bestimmt.

Die *Auftrags-erzeugung* legt sowohl den Plan-Zugang und den Plan-Abgang der Produktion als auch die Plan-Reihenfolge für die Auftragsbearbeitung fest. Aus diesem Grund wird sie traditionell, gerade im Bereich der auftragsbezogenen Fertigung und Montage, als Aufgabe der Produktionsplanung (vgl. Abschnitt 2.3.3) verstanden, die bereits im Rahmen des Aachener PPS-Modells erläutert wurde. Die Aufgaben der Produktionssteuerung sind somit die Auftragsfreigabe, die Kapazitätssteuerung und die Reihenfolgebildung. (LÖDDING 2008)

Die *Auftragsfreigabe* definiert, aufbauend auf den Ergebnissen der Produktionsplanung, den Zeitpunkt, zu welchem die Freigabe der Aufträge für die Ausführung der eigentlichen Produktion erfolgt (SCHUH & ROESGEN 2006). Sie legt dadurch den Ist-Zugang der Produktion sowie die Reihenfolge fest, in welcher die Aufträge in die Produktion gegeben werden. Für die Auftragsfreigabe stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung, die auf einer jeweils definierten In-

formationsgrundlage (Plan-Starttermin, aktuelle Belastung eines Arbeitssystems etc.) basieren. Über die Stellgröße *Ist-Zugang* nimmt die Auftragsfreigabe aktiv Einfluss auf die Regelgröße *Umlaufbestand*, welche wiederum auf die logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung wirkt (LÖDDING 2008).

Im Rahmen der *Kapazitätssteuerung* erfolgt die kurzfristige Anpassung der Kapazitäten der Arbeitssysteme in der Produktion. Sie legt dabei die tatsächlich eingesetzten Produktionsressourcen (Maschinen, Personal etc.) fest und stellt deren Verfügbarkeit sicher (LÖDDING 2008, WIENDAHL 2010). Die hierfür notwendige Kapazitätsflexibilität (vgl. Abschnitt 2.2.6) basiert maßgeblich auf der Flexibilität der Mitarbeiter hinsichtlich ihrer jeweiligen Arbeitszeiten (BEGEMANN 2005). Die Kapazitätssteuerung wirkt somit maßgeblich auf den *Ist-Abgang* der Produktion, welcher wiederum die Regelgrößen *Umlaufbestand* und *Rückstand* beeinflusst. Über diese beiden Regelgrößen wirkt die Kapazitätssteuerung als einzige der vier Aufgaben auf alle vier logistischen Zielgrößen (LÖDDING 2008, OSTGATHE 2012).

Die *Reihenfolgebildung* bestimmt die Abarbeitungssequenz der Aufträge an den Arbeitssystemen. In Abhängigkeit der logistischen Zielsetzung stehen verschiedene Prioritätsregeln und Steuerungsverfahren zur Verfügung, die die Aufträge in den Warteschlangen nach bestimmten Kriterien (z. B. Bearbeitungszeit, Plan-Endtermin) vor den Arbeitssystemen sortieren bzw. priorisieren. Die Reihenfolgebildung definiert somit die Ist-Reihenfolge der Aufträge vor den Arbeitssystemen und über die Regelgröße *Reihenfolgeabweichung* wirkt sie auf die logistische Zielgröße Termintreue (LÖDDING 2008). Gerade in Produktionsumgebungen mit erhöhten Umlaufbeständen, wie beispielsweise in der Werkstattfertigung, kommt der Reihenfolgebildung eine hohe Wichtigkeit im Hinblick auf die Termintreue zu (YU 2001, OSTGATHE 2012).

Ergänzend zu den Aufgaben nach dem Modell der Fertigungssteuerung gilt die *Auftragsüberwachung* als eine weitere wichtige Aufgabe der Produktionssteuerung (MERTENS 1996). Sie hat zum Ziel, den kompletten Durchlauf eines Auftrags in der Produktion von der Freigabe bis zur Fertigstellung zu überwachen. Darüber hinaus sollen Störungen und unvorhergesehene Ereignisse identifiziert sowie adäquate Gegenmaßnahmen zur Minimierung möglicher Konsequenzen eingeleitet werden. Hierfür ist eine hinreichende Transparenz über den aktuellen Fortschritt eines Auftrags, welche durch einen regelmäßigen Abgleich von Plan- und Ist-Informationen aus der Produktion erreicht werden kann, notwendig. Neben der Überwachung von Aufträgen ist es durch den Einsatz moderner IuK-Technologien möglich, die eingesetzten Produktionsressourcen (z. B. Maschinen, Werkzeuge) ebenfalls zu überwachen und somit im Falle von erheblichen Planabweichungen beispielsweise eine veränderte Kapazitätsbelegung vorzunehmen (SCHUH & ROESGEN 2006). Im Hinblick auf die Entwicklung des Systems für eine situationsbasierte Produktionssteuerung im Rahmen der vorliegenden Arbeit

haben die Auftragsüberwachung und die damit verbundene Informationslogistik 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. 2007), weshalb das Informationsmanagement in der Produktion im folgenden Abschnitt detailliert betrachtet wird. (OSTGATHE 2012)

2.4 Informationsmanagement in der Produktion

2.4.1 Begriffsdefinitionen

In diesem Abschnitt erfolgt die Definition und die Abgrenzung der Begriffe *Daten*, *Informationen*, *Informationsfluss* und *Informationsmanagement* für die weitere Verwendung und das Begriffsverständnis im Rahmen dieser Arbeit.

Die Formulierung von *Informationen* erfolgt durch die kontextbasierte Verdichtung und Verarbeitung von Zeichenfolgen, die als *Daten* bezeichnet werden (JÜNEMANN & BEYER 1998, DIPPOLD et al. 2005). In Abgrenzung zu den objektiven, quantitativen Daten werden Informationen aufgrund ihres semantischen Kontextbezugs als subjektiv und qualitativ charakterisiert (HILDEBRAND 2001). Informationen sind somit zweckorientiert und können zur Planung, Steuerung und Ausführung von Handlungen eingesetzt werden kann (WITTMANN 1959, STICKEL 2001). Im produktionstechnischen Verständnis sind Informationen somit Nachrichten über den Zustand von betrieblichen Systemen bzw. den Verlauf betrieblicher Prozesse, die in der Regel mit einer Funktion zur Planung oder Steuerung eines Systems verbunden sind (HEIDERICH 2001, OSTGATHE 2012). Nach DIN 44300 stellen in diesem Zusammenhang sogenannte *Echtzeit-Informationen* eine Charakterisierung für Informationen dar, die in Echtzeit, d. h. innerhalb einer für den jeweiligen Anwendungsfall vorgegebenen Zeitspanne, durch die vorhandenen Rechensysteme garantiert zur Verfügung gestellt werden (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 1972).

Als *Informationsfluss* wird, in Abgrenzung zur Definition des statischen Informationsbegriffes, der dynamische Vorgang der informationstechnischen Bereitstellung und Weiterleitung von Daten bezeichnet. Der Informationsfluss gliedert sich dabei in die Aufgaben Informationserzeugung, -übermittlung, -verarbeitung, -speicherung sowie -verwertung und kann dem Materialfluss im betrieblichen Umfeld je nach Anwendungsfall vorauslaufen, nacheilen (entkoppelter Informationsfluss) oder diesen begleiten (synchronisierter Informationsfluss). (WINZ & QUINT 1997, OSTGATHE 2012)

Die Planung, Steuerung und Kontrolle des Einsatzes des dispositiven Produktionsfaktors Information werden als Aufgaben des sogenannten *Informationsmanagements* zusammengefasst. Hierfür stehen in der Regel Software-Systeme (z. B. PPS-Systeme) zur Verfügung, deren Bedeutung aufgrund des zunehmenden Informationsangebotes und des gestiegenen Informationsbedarfs zur Beherrschung der dynamischen Komplexität von betrieblichen Abläufen und Prozessen in den vergangenen Jahren stark zugenommen hat. Unter Berücksichtigung des Ziels der Produktionssteuerung ist ein gut funktionierendes Informationsmanagement unabdinglich. Hierdurch muss sichergestellt werden, dass entscheidungsrelevante Informationen über den aktuellen Zustand der betrachteten Produktion rechtzeitig am richtigen Ort und in der notwendigen Qualität vorliegen. Das Informationsmanagement schafft somit Transparenz in der Produktion und bildet damit die Basis für eine effektive, robuste und flexible Produktionssteuerung. (JÜNEMANN & BEYER 1998, STICKEL 2001, BIETHAHN et al. 2004, KURBEL 2005, PILLER 2006, OSTGATHE 2012, BLUNCK & WINDT 2013)

2.4.2 Informations- und Kommunikationstechnologien

2.4.2.1 Allgemeines

Die Grundlage eines effizienten Informationsmanagements bilden moderne IuK-Technologien. Durch die Möglichkeit der Echtzeit-Überwachung von Produktionsabläufen sowie Produkt- und Ressourcenzuständen können relevante Informationen an die Software-Systeme zur Produktionssteuerung zurückgemeldet und darauf aufbauend eine flexible und adaptive Produktionssteuerung ausgeführt werden (OSTGATHE 2012). Erfolgskriterien stellen hierfür insbesondere die Qualität und die Aktualität der Informationen zur betrachteten Produktionssituation dar (HUANG et al. 2007, SCHUH et al. 2007). Die gezielte Integration moderner IuK-Technologien in Systeme zur Steuerung von Produktionsabläufen ist somit ein vielversprechender Ansatz, um die erhöhte Steuerungskomplexität in der heutigen Produktion zu beherrschen und eine zeitgemäße Produktionssteuerung zu realisieren. Hierbei können insbesondere automatische Identifikationssysteme (Auto-ID-Systeme) einen erheblichen Beitrag leisten (FLEISCH et al. 2005, REINHART et al. 2013a). Im Folgenden werden zuerst die für die Planung und Steuerung von Produktionsabläufen verfügbaren Software-Systeme vorgestellt, bevor die für die Produktion relevanten Auto-ID-Systeme detailliert werden.

2.4.2.2 Software-Systeme zur PPS

Der in den 1990er Jahren vollzogene Wandel von einer funktionsorientierten hin zu einer prozessorientierten Ablauforganisation brachte eine wesentliche Veränderung bei den in Unternehmen eingesetzten Software-Systemen mit sich und

2 Grundlagen

hatte das Ziel, alle Unternehmensbereiche informationstechnisch zu integrieren. Software-Systeme, die die Aufgaben der sowohl kaufmännischen als auch technischen Auftragsabwicklung unterstützen, werden in diesem Zusammenhang als *Enterprise Resource Planning (ERP) Systeme* bezeichnet. (SCHUH & LASSEN 2006, THOME 2007, FUCHS 2013)

Sofern in ERP-Systemen eine Abbildung der Aufgaben der PPS (vgl. Abschnitt 2.3) erfolgt, wird in der Literatur meist von *PPS-Systemen* gesprochen. Die konzeptuelle Basis der PPS-Systeme bildet das sogenannte Material Requirements Planning (MRP), das sich auf die Materialwirtschaft im Sinne einer Bedarfsrechnung über Stücklistenauflösungen und Lagerbestände fokussiert. Dieses MRP-Konzept wurde zum sogenannten Manufacturing Resource Planning (MRP II) weiterentwickelt, in dem zusätzliche Planungsstufen und dabei insbesondere die kurzfristige Kapazitätsterminierung integriert wurden. Das MRP II-Konzept wird in der Literatur häufig als konventionelles PPS-Verfahren bezeichnet, da es den Kern vieler bestehender PPS-Systeme darstellt. (WINDT 2001, HOPP & SPEARMAN 2004, ARNOLD et al. 2008, FUCHS 2013)

Im Rahmen der PPS werden ERP- bzw. PPS-Systeme häufig durch sogenannte *Betriebsdatenerfassungssysteme (BDE-Systeme)* ergänzt, die vor allem zur Überwachung von Produktionsaufträgen, Transport- und Lagerbewegungen sowie Personal- und Betriebsmittelverfügbarkeiten eingesetzt werden. Wie in Abschnitt 1.2 ausführlich beschrieben, weisen BDE-Systeme sowie die zielgerichtete Verwendung der erfassten Daten im Rahmen der Produktionssteuerung jedoch wesentliche Verbesserungspotenziale auf. (BECKERT & HUDETZ 2002, VAJNA et al. 2009, SCHUH & STICH 2011)

Trotz der starken Verbreitung in produzierenden Unternehmen, liegen erhebliche Nachteile und Kritikpunkte bezüglich konventioneller PPS-Systeme vor. Hierzu zählen vor allem die rein sequentielle Abarbeitung der Aufgaben der PPS, die fehlende Berücksichtigung bestehender Abhängigkeiten zwischen den Planungsstufen sowie die unzureichenden Reaktionsmöglichkeiten auf ungeplante Ereignisse in der Produktion (z. B. verspätete Fertigstellung eines Produktionsauftrags). Darüber hinaus basiert die Produktionsplanung meist auf Vergangenheitsdaten, wodurch eine realitätsnahe Steuerung der Abläufe in der Produktion nur schwer sicherzustellen ist. Die häufig minutiösen feinterminierenden Maschinenbelegungspläne, als ein wesentliches Planungsergebnis, sind von der Steuerung, aufgrund unerwarteter Einflüsse in der Produktion, häufig nicht einzuhalten und stellen insgesamt keine optimale Lösung dar. Zusammenfassend beherrschen die am Markt verfügbaren, konventionellen PPS-Systeme die Aufgaben und Herausforderungen der Produktionsplanung vergleichsweise gut, jedoch wird insbesondere eine situationsbasierte Produktionssteuerung von diesen Systemen nicht abgedeckt. (KIESEWETTER 1991, WEIDNER 1992, WINDT 2001, KURBEL 2005, MÜLLER 2005, HOPP & SPEARMAN 2011, FUCHS 2013)

Um die bestehende Informationslücke zwischen der *Planungsebene* und der *Prozessebene* zu überwinden und eine kurzfristige Feinplanung und Produktionssteuerung zu ermöglichen, haben sich auf der *Steuerungsebene* seit Anfang des aktuellen Jahrtausends Software-Systeme angesiedelt, die als sogenannte *Manufacturing Execution Systeme (MES)* bezeichnet werden (KLETTI 2006, KLEINERT & SONTOW 2010).

Gemäß der VDI-RICHTLINIE 5600 (2007) können acht Aufgabenbereiche für die zielgerichtete PPS definiert werden (vgl. Abbildung 8), die den Maximalumfang eines MES beschreiben, jedoch im Rahmen des vorliegenden Abschnitts nicht weiter detailliert werden.

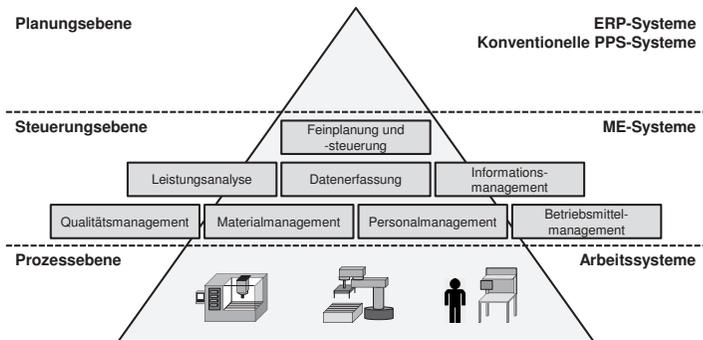


Abbildung 8: Einordnung der Aufgaben eines MES in die Leitebenen eines Unternehmens (FUCHS 2013)

Im Kontext von Feinplanungssystemen sind neben den für diese Arbeit relevanten MES auch die *Advanced Planning and Scheduling (APS) Systeme* zu nennen, die das Ziel verfolgen, eine möglichst kostengünstige und gemäß den logistischen Zielgrößen ideale Maschinenbelegungsplanung vorzunehmen. Dabei wird die Planungsaufgabe in Teilprobleme zerlegt und mit Hilfe mathematischer Optimierungsalgorithmen gelöst. APS-Systeme lassen sich sowohl zur Feinplanung von abgeschlossenen Produktionsumgebungen als auch von ganzen Lieferketten einsetzen. (FLEISCHMANN et al. 2008, FUCHS 2013)

2.4.2.3 Auto-ID Systeme in der Produktion

Die Aufgabe und das Ziel von Auto-ID-Systemen sind die Identifikation und die Bereitstellung von Informationen zu Personen, Tieren oder Objekten (FINKENZELLER 2008). Man unterscheidet eine Vielzahl von Auto-ID-Systemen, wobei im Folgenden die wichtigsten Identifikationstechnologien für die Produktion mit ihrer Charakteristik in Anlehnung an KERN (2007), FINKENZELLER (2008) und OSTGATHE (2012) vorgestellt werden.

2 Grundlagen

Der *Barcode* ist die am weitesten verbreitete Auto-ID-Technologie und besteht aus einer Abfolge von Strichen, welche in unterschiedlicher Dicke und variierendem Abstand zueinander stehen. Er wird durch die optische Laserabtastung ausgelesen und ist damit maschinenlesbar. Zur Steigerung der Informationsdichte wurde der eindimensionale Barcode zu zweidimensionalen Stapel- und Matrixcodes weiterentwickelt. Den Vorteilen geringer Kosten und hoher Standardisierung stehen die Nachteile der Notwendigkeit einer direkten Sichtverbindung zwischen Lesegerät und Barcode, des geringen Speichervolumens sowie der Anfälligkeit gegenüber Verschmutzung und Beschädigung gegenüber.

Verfahren zur Klarschrifterkennung, die als *OCR (Optical Character Recognition)* bezeichnet werden, haben die Eigenschaft, nicht nur von Menschen sondern auch von Maschinen automatisch gelesen werden zu können. Hieraus leitet sich die vorteilhafte Möglichkeit ab, im Notfall oder zu Kontrollzwecken die gespeicherten Informationen auch visuell erfassen zu können. OCR-Systeme weisen zwar auch eine relativ hohe Informationsdichte auf, jedoch sind diesen Vorteilen geringe Lesereichweiten und ein hoher Preis gegenüberzustellen.

Chipkarten sind in Plastikkarten integrierte elektronische Datenspeicher und nutzen zur Datenübertragung einen direkten galvanischen Kontakt. Der wesentliche Vorteil der Chipkarte gegenüber den bisher vorgestellten Auto-ID-Systemen ist die Möglichkeit, gespeicherte Informationen durch ein Passwort bzw. eine persönliche Identifikationsnummer (PIN) gegen unerwünschten Zugriff und Manipulation zu schützen. Dies ist der Grund, weshalb Chipkarten vor allem in sicherheitsrelevanten Anwendungsfeldern zu finden sind. Chipkarten haben die nachteilige Eigenschaft einer hohen Anfälligkeit für Abnutzung, Korrosion und Verschmutzung sowie eines hohen Handling-Aufwands.

RFID-Systeme (Radio Frequency Identification) gelten als leistungsfähige Auto-ID-Systeme, deren Funktion auf der drahtlosen Übertragung von Daten basiert. Aufgrund der Tatsache, dass für den Austausch von Informationen in einem RFID-System weder ein physischer noch ein optischer Kontakt zwischen dem Schreib-/Lesegerät und dem Transponder notwendig ist sowie aufgrund des vergleichsweise großen Speichervolumens auf einem Transponder können die Anwendungsfelder gegenüber konventionellen Auto-ID-Systemen erheblich erweitert werden. Gemäß BSI - BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT IN DER INFORMATIONSTECHNIK (2004) erweisen sich die hohen Anschaffungs- und Implementierungskosten, die fehlenden Standards sowie der schwer sicherzustellende Datenschutz bisher als Hürde für einen breiteren Einsatz der RFID-Technologie.

Für die im Rahmen dieser Arbeit adressierte situationsbasierte Produktionssteuerung bietet die RFID-Technologie in Abgrenzung zu den anderen Auto-ID-Systemen zahlreiche vorteilhafte Nutzenpotenziale. Im Folgenden werden aus

diesem Grund die technologischen Grundlagen eines RFID-Systems näher erläutert.

2.4.3 Grundlagen der RFID-Technologie

In der Literatur sind unterschiedliche Definitionen für ein RFID-System zu finden. Diese Arbeit lehnt sich dabei an die VDI-RICHTLINIE 4416 (1998) an, nach der sich ein RFID-System aus den Komponenten Transponder, Schreib-/Lesegerät sowie einem Rechner mit einer Middleware bzw. Applikationssoftware zusammensetzt (vgl. Abbildung 9).

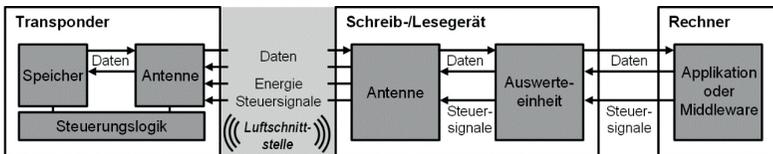


Abbildung 9: Aufbau eines RFID-Systems (FINKENZELLER 2008)

Unter einem Transponder wird der Datenträger eines RFID-Systems verstanden, der an einem zu identifizierenden Objekt angebracht ist. Er besteht im Wesentlichen aus einem elektronischen Mikrochip und einer Antenne. Der Mikrochip enthält als Speicher des Transponders mindestens eine eindeutige Identifikationsnummer (Objekt-ID), die ausgelesen werden kann. Je nach Anwendungsfall und Art des Transponders lassen sich weitere sogenannte Nutzdaten im User Memory speichern. Über die Antenne, welche als Sende-/Empfangseinheit des Transponders fungiert, kann eine Luftschnittstelle, d. h. eine kontaktlose physikalische Kopplung, zwischen Transponder und Schreib-/Lesegerät aufgebaut werden. Diese Kopplung erfolgt mit Hilfe elektrischer (kapazitive Kopplung) oder magnetischer Felder (induktive Kopplung) bzw. elektromagnetischer Wellen (Strahlungskopplung) und dient dazu, den Transponder mit Energie zu versorgen sowie die gespeicherten Daten auszulesen oder bei Bedarf zu verändern, zu ergänzen oder zu löschen. Über das Schreib-/Lesegerät bzw. dessen Antenne wird somit die Kommunikation zu dem Transponder realisiert, der auf dessen Befehl reagiert und nicht selbständig aktiv werden würde. Die Kontrolle des Schreib-/Lesegerätes und damit die Realisierung eines Datenaustausches im RFID-System erfolgt über einen Rechner mit einer Middleware bzw. Applikationssoftware. Diese steuert das Schreib-/Lesegerät und nimmt die zurückgesendeten Signale auf, filtert und verarbeitet diese. Die Middleware bzw. Applikationssoftware ist somit für die Abfolge der einzelnen Schreib- und Leseoperationen verantwortlich und kommuniziert mit den übergeordneten betrieblichen Planungs- und Steuerungssystemen. Im Bereich der PPS handelt es sich hierbei um die zuvor beschriebenen ERP-Systeme, PPS-Systeme und MES, die auf Basis der Transponderinformationen Planungs- und Steuerungsaufgaben ausführen. Erfolgt

2 Grundlagen

eine direkte Kopplung des RFID-Systems mit einer Maschine oder Anlage, so handelt es sich bei dem übergeordneten System meist um eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS). (KERN 2007, FINKENZELLER 2008, GÜNTHER et al. 2008, OSTGATHE 2012)

Neben dem Kopplungsverfahren ist die Betriebsfrequenz eines der wesentlichen technischen Unterscheidungsmerkmale eines RFID-Systems. Es kommen hauptsächlich vier Frequenzbereiche zum Einsatz, wobei in heutigen Produktionsanwendungen vor allem der HF-Frequenzbereich genutzt wird (KERN 2007, FINKENZELLER 2008, OSTGATHE 2012):

- Low Frequency (LF): 120 kHz bis 135 kHz
- High Frequency (HF): 13,56 MHz
- Ultra High Frequency (UHF): 868 MHz (Europa), 915 MHz (USA)
- Mikrowelle (MW): 2,45 GHz bzw. 5,8 GHz

Wie bereits benannt, weist die RFID-Technologie einige vorteilhafte Eigenschaften gegenüber anderen Auto-ID-Systemen auf, die gerade in dem herausfordernden Umfeld der Produktion entscheidend sind. Diese können in Anlehnung an FINKENZELLER (2008) und PHILIPP (2014) folgendermaßen zusammengefasst werden:

- *Großes Speichervolumen und hohe Datendichte:* Die eingesetzte Halbleitertechnologie in den Mikrochips erlaubt das Speichern großer Datenmengen auf vergleichsweise geringem Raum. Es ist davon auszugehen, dass die Speicherkapazität in Zukunft weiter steigen wird.
- *Keine Sichtverbindung erforderlich:* Durch die physikalische Kopplung in einem RFID-System kann eine Datenübertragung auch ohne optischen Kontakt, durch eine Vielzahl an Materialien hindurch, erfolgen.
- *Hohe Lesegeschwindigkeit und -reichweite:* Die Kommunikation in einem RFID-System über Radiowellen sowie die einfache Handhabung der Systeme begünstigen vergleichsweise hohe Lesegeschwindigkeiten und -reichweiten.

Weiterführende Informationen zur Funktionsweise und den technologischen Grundlagen eines RFID-Systems sowie möglichen Anwendungsfeldern finden sich in der einschlägigen Literatur, wie z. B. KERN (2007), FINKENZELLER (2008) und GÜNTHER et al. (2008).

Im folgenden Kapitel 3 werden die Anforderungen an eine zeitgemäße Produktionssteuerung definiert, auf welchen die weiteren Ausführungen dieser Arbeit aufbauen.

3 Anforderungen an eine zeitgemäße Produktionssteuerung

3.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden die Anforderungen definiert, die eine zeitgemäße Produktionssteuerung zur Beherrschung der steigenden Steuerungskomplexität erfüllen muss. Diese Anforderungen resultieren aus der in Kapitel 1 aufgezeigten Problemstellung der auftragsbezogenen Produktion, die durch immer kleinere Losgrößen und steigende Variantenzahlen geprägt ist und meist nach dem Verrichtungsprinzip organisiert wird. Stillschweigend wird dennoch durch die vom Kunden dominierten Märkte eine hohe logistische Zielerreichung gefordert, welche sich insbesondere in der Forderung nach kurzen Lieferzeiten und einer hohen Termintreue widerspiegelt. Durch den in Kapitel 2 dargestellten direkten Einfluss der Produktionssteuerung auf die logistische Zielerreichung ist eine zeitgemäße Ausführung der Produktionssteuerung unter Einsatz moderner IuK-Technologien erfolgsentscheidend für produzierende Unternehmen. Aus diesem Grund gilt es, Anforderungen zu definieren, die ein System zur zeitgemäßen Produktionssteuerung erfüllen muss, um die logistischen Leistungsziele eines Unternehmens zu erreichen.

3.2 Flexibilität und Adaptierbarkeit

Ein System für eine zeitgemäße Produktionssteuerung muss flexibel anwendbar und unabhängig von den in einem Unternehmen vorliegenden Produktionstypen sowie dem vorhandenen Automatisierungsgrad sein. Unter dieser Forderung wird verstanden, dass eine zielgerichtete Steuerung der Produktionsabläufe sowohl in nach dem Fließprinzip als auch nach dem Verrichtungsprinzip organisierten Produktionsumgebungen ermöglicht werden muss. Diese Art der Flexibilität bedingt einen allgemeingültigen Charakter des Systems, dessen Systemelemente (z. B. Steuerungsverfahren) einerseits mit bestehenden konventionellen Ansätzen der Produktionssteuerung harmonisieren müssen. Andererseits muss sichergestellt werden, dass das System adäquat an die unternehmensspezifischen Randbedingungen und Zielgrößen adaptierbar ist. Dies bedeutet, dass die spezifischen Charakteristika (priorisierte logistische Zielgrößen, Produktionsprogramm etc.) einer zu steuernden Produktionsumgebung bei der Konfiguration, Implementierung und Ausführung der Teilelemente eines Systems zur zeitgemäßen Produktionssteuerung jederzeit berücksichtigt werden können müssen. (LÖDDING 2008, OSTGATHE 2012)

3.3 Modularisierung und Synchronisierung

Ein vielversprechendes Mittel zur Beherrschung der steigenden Steuerungskomplexität stellt, wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, die Segmentierung bzw. Modularisierung einer Produktionsumgebung im Rahmen der Betriebsorganisation dar. Da eine Produktionsmodularisierung, welche in der Regel ausschließlich auf der Produktstruktur basiert, in vielen Fällen zur Komplexitätsbeherrschung nicht ausreicht, muss ein System zur zeitgemäßen Produktionssteuerung Prinzipien definieren, nach denen eine Produktion *steuerungsorientiert* modularisiert werden kann. Um seitens der Produktionssteuerung die Abläufe in Fertigung und Montage zielgerichtet koordinieren zu können, müssen die Steuerungsverfahren des Systems für die einzelnen Produktionsmodule passend ausgelegt und dabei inter- und intramodulare Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Aufbauend auf einer solchen steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung muss ein System zur Produktionssteuerung für zeitlich synchrone Abläufe der Produktionsmodule sorgen. Damit wird im Sinne des Modularisierungsgedanken gewährleistet, dass die einzelnen Produktionsmodule selbstoptimierend und kapazitiv unabhängig voneinander ihre jeweiligen Produktionsaufgaben erfüllen können, aber dennoch die rechtzeitige Materialbereitstellung sowie Erreichung der logistischen Zielgrößen durch das gesamte Produktionssystem sichergestellt werden. (HÖGE 1995, WILDEMANN 1998, SCHUH & SCHMIDT 2006, TAKEDA 2009, WIENDAHL 2010, STÜRMANN 2012)

3.4 Informationstransparenz und Situationsbezogenheit

Wie bereits in Abschnitt 2.3 dargestellt, gewinnt die Auftragsüberwachung für die Einhaltung der logistischen Zielgrößen immer mehr an Bedeutung. Dabei wird das Ziel angestrebt, einen kompletten Auftragsdurchlauf in der Produktion zu verfolgen, um jederzeit den aktuellen Fortschritt oder etwaige unvorhergesehene Ereignisse in den Steuerungsentscheidungen berücksichtigen zu können. Dieser Anspruch an eine zeitgemäße Produktionssteuerung erfordert somit ein hohes Maß an Transparenz hinsichtlich der aktuellen Produktionssituation. Ein vielversprechender Ansatz hierfür ist, wie bereits in den vorangehenden Kapiteln beschrieben, die Kopplung neuer IuK-Technologien (z. B. Auto-ID-Systeme) mit den Objekten (z. B. Produkte) in der Produktion. So ist es möglich, dass diese Objekte als sogenannte intelligente Objekte ihren aktuellen Status (z. B. Bearbeitungsfortschritt) kennen und diesen entsprechend an die übergeordneten Planungs- und Steuerungssysteme kommunizieren. Diese Software-Systeme schaffen so ein reales Abbild über den aktuellen Zustand in der Produktion und können entsprechend situationsbasiert handeln. Neben einer durchgängigen, echtzeitnahen Überwachung der Aufträge (Tracking & Tracing) muss durch eine zeitgemäße Produktionsteuerung ebenfalls die Möglichkeit geschaffen werden,

aktuelle produktspezifische Informationen (z. B. Qualitätsdaten, Liefertermine) in die Steuerung und Ausführung von Produktionsabläufen einfließen zu lassen. Dies kann einerseits unter Einsatz einer dezentralen Datenhaltung durch das intelligente Objekt selbst oder andererseits durch zentrale Planungs- und Steuerungssysteme gewährleistet werden. (MERTENS 1996, SCHUH & ROESGEN 2006, SCHUH et al. 2007)

3.5 Referenzarchitektur und Informationsmanagement

Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung der zuvor detaillierten Anforderungen ist eine adäquate Organisation der für eine zielgerichtete Produktionssteuerung notwendigen Software-Systeme, Objekte (Ressourcen und Produkte) und Informationen unter Einsatz einer sogenannten Referenzarchitektur. Zum einen gilt es im Rahmen dieses Informationsmanagements festzulegen, welche Informationen zur Ausführung der jeweiligen Steuerungsaufgaben und -verfahren vorliegen müssen. Zum anderen muss definiert werden, welche Steuerungselemente, d. h. Software-Systeme oder Objekte, für die Generierung, Bereitstellung und Verteilung der steuerungsrelevanten Informationen zuständig sind. Zudem muss eine solche Referenzarchitektur die Aufgaben, Schnittstellen und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Steuerungselementen spezifizieren, damit deren Interaktion in der Ausführung der einzelnen Steuerungsverfahren berücksichtigt werden kann. Neben der Referenzarchitektur, die als allgemeingültige Organisationsstruktur mit Vorlagencharakter verstanden werden kann, gilt es, die steuerungsrelevanten Daten und deren Strukturen eindeutig zu spezifizieren. (JÜNEMANN & BEYER 1998, BONGAERTS et al. 2000, FRESE 2005, KRÄKEL 2007, SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007, OSTGATHE 2012)

3.6 Leitsätze für zeitgemäße Produktionssteuerungsverfahren

Die Anforderungen an Verfahren zur Produktionssteuerung lassen sich nach LÖDDING (2008) allgemein mit Hilfe sogenannter Leitsätze beschreiben. Dieser Abschnitt soll die wesentlichen dieser Leitsätze für eine *zeitgemäße* Produktionssteuerung spezifizieren und gemäß den bereits formulierten Anforderungen ergänzen:

1. Die aktuelle Produktionssituation (z. B. aktueller Auftragsstatus) soll mit Hilfe einer hohen Informationstransparenz bei der Entscheidungsfindung durch die Steuerungsverfahren berücksichtigt werden.
2. Steuerungsverfahren sollen den Umlaufbestand eines Produktionssystems auf einem definierten Niveau halten, somit möglichst wenige Bestandschwankungen verursachen und Bestandsblockaden verhindern.

3 Anforderungen an eine zeitgemäße Produktionssteuerung

3. Die aktuelle Belastung der Produktion soll im Rahmen der Produktionssteuerung mit der verfügbaren Kapazität abgeglichen und etwaige Planabweichungen durch eine Rückstandsregelung eingeschränkt werden.
4. Steuerungsverfahren sollen möglichst wenige Reihenfolgevertauschungen verursachen und möglichst einfach implementierbar sein.
5. In einer modularisierten Produktion sollen Steuerungsverfahren inter- und intramodulare Abhängigkeiten berücksichtigen und dem einzelnen Modul Freiheitsgrade zur Anpassung von Produktionsabläufen einräumen.
6. In der auftragsbezogenen Fertigung und Montage sollen Steuerungsverfahren die logistischen Ziele geringe Durchlaufzeit und hohe Termintreue begünstigen. Engpass-Arbeitssysteme sollen auslastungsorientiert unter Einhaltung der Terminanforderungen gesteuert werden.

Basierend auf den definierten Anforderungen an ein System zur zeitgemäßen Produktionssteuerung werden im nachfolgenden Kapitel hierfür relevante Konzepte und Forschungsarbeiten vorgestellt und erläutert.

4 Stand der Forschung und Technik

4.1 Übersicht

Kapitel 4 beschreibt den relevanten Stand der Forschung und Technik im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit und baut auf den in Kapitel 2 eingeführten Grundlagen und den in Kapitel 3 definierten Anforderungen auf. Hierzu erfolgt in Abschnitt 4.2 die Darstellung und Diskussion von Verfahren und Ansätzen zur Steuerung von Produktionsabläufen. Abschnitt 4.3 widmet sich den unterschiedlichen Möglichkeiten zur Organisation und Strukturierung von Systemen zur Produktionssteuerung und fokussiert dabei im Speziellen auf deren Vor- und Nachteile. Zur Modellierung, Speicherung und Strukturierung auftrags- und produktbezogener Informationen, die eine wesentliche Grundlage des situationsbasierten Steuerungssystems bilden, existieren in Forschung und Praxis verschiedene Konzepte und Empfehlungen, die in Abschnitt 4.4 diskutiert werden. Nach der Bewertung und Beurteilung der vorgestellten Konzepte und Forschungsarbeiten hinsichtlich der Relevanz für die vorliegende Arbeit, erfolgt die Ableitung des Handlungsbedarfs in Abschnitt 4.5.

4.2 Ansätze zur Steuerung von Produktionsabläufen

4.2.1 Allgemeines

Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit werden in diesem Abschnitt in einem ersten Schritt konventionelle und in der Praxis verbreitete Verfahren zur Ausführung der Steuerungsaufgaben Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung (vgl. Abschnitt 4.2.2) dargestellt und diskutiert. Darauf aufbauend werden sogenannte adaptive Ansätze zur Produktionssteuerung erläutert, die eine Berücksichtigung der aktuellen Produktionssituation bei der Ausführung ihrer Steuerungsentscheidungen, u. a. durch den Einsatz intelligenter Produkte, vorsehen und so eine verbesserte logistische Zielerreichung anstreben (vgl. Abschnitt 4.2.3). Die Segmentierung bzw. Modularisierung von Arbeitssystemen stellt eine vielversprechende Möglichkeit zur Beherrschung der dynamischen Komplexität in der Produktion dar. Hierauf basieren verschiedene Ansätze und Potenziale für die Produktionssteuerung (vgl. Abschnitt 4.2.4), die bei der Entwicklung des situationsbasierten Steuerungssystems besonders relevant sind (vgl. Kapitel 3).

4.2.2 Konventionelle Verfahren zur Produktionssteuerung

4.2.2.1 Verfahren zur Auftragsfreigabe

Allgemeines

LÖDDING (2008) unterscheidet zur Klassifizierung von Steuerungsverfahren zur Auftragsfreigabe (vgl. Abschnitt 2.3.4) zwischen drei Merkmalen:

- Kriterium der Auftragsfreigabe
- Detaillierungsgrad
- Auslösungslogik

Das *Kriterium der Auftragsfreigabe* legt fest, ob ein Auftrag sofort nach der Auftragserzeugung (Direkte Auftragsfreigabe), zu einem bestimmten Zeitpunkt (Auftragsfreigabe nach Termin) oder in Abhängigkeit des Umlaufbestandes bzw. der Belastung in der Produktion (Bestandsregelnde Auftragsfreigabe) freigegeben wird. Die bestandsregelnde Auftragsfreigabe bestimmt somit den Ist-Auftragszugang durch den tatsächlichen Ist-Auftragsabgang der Produktion (vgl. Abschnitt 2.3.4), wodurch eine solche Auftragsfreigabe entscheidende Vorteile (z. B. Planbarkeit der Durchlaufzeiten) gegenüber den anderen Freigabekriterien aufweist und somit insbesondere für eine situationsbasierte Produktionssteuerung relevant ist. Zu der bestandsregelnden Auftragsfreigabe wurden unterschiedliche Verfahren entwickelt, die nachfolgend erläutert werden. (LÖDDING 2008)

Der *Detaillierungsgrad* gibt an, ob ein Auftrag als Ganzes freigegeben wird (niedriger Detaillierungsgrad) oder ob dessen Arbeitsvorgänge separat für die Bearbeitung zugelassen werden (hoher Detaillierungsgrad) (LÖDDING 2008). Gemäß der Anforderung nach synchronen Abläufen in einer modularisierten Produktion (vgl. Kapitel 3), ist es wichtig, Teilmfänge eines Auftrags für die Produktion zu unterschiedlichen Zeitpunkten freigegeben zu können.

Die *Auslösungslogik* eines Auftragsfreigabeverfahrens definiert, ob es sich um eine periodische oder um eine ereignisorientierte Auftragsfreigabe handelt. Grundsätzlich lässt sich ein Verfahren sowohl periodisch als auch ereignisorientiert auslösen. Bei der periodischen Auslösungslogik erfolgt die Auftragsfreigabe ausschließlich in vorab definierten, wiederkehrenden Zeitintervallen oder zu bestimmten Zeitpunkten (z. B. zu Beginn einer Arbeitswoche), wodurch es zu sehr großen Bestandsschwankungen kommen kann. Bei der ereignisorientierten Auftragsfreigabe wird die Freigabe eines Auftrags durch ein definiertes Ereignis ausgelöst (z. B. Änderung einer Bestandsgrenze). Durch die inhärente Berücksichtigung der aktuellen Produktionssituation bei der Steuerungsentscheidung, kommt es bei dieser Auslösungslogik zu wesentlich geringeren Bestandsschwankungen und kürzeren Durchlaufzeiten. In konventionellen Systemen zur Produktionssteuerung ist eine ereignisorientierte Auftragsfreigabe mit einem hohen

Umsetzungsaufwand verbunden, da sämtliche steuerungsrelevanten Ereignisse in der Produktion erfasst werden müssen. (LÖDDING 2008)

Auftragsfreigabeverfahren

Nach heutigem Stand der Technik ist die Auftragsfreigabe nach Termin in den meisten PPS-Systemen für die auftragsbezogene Produktion umgesetzt. Dieses Auftragsfreigabeverfahren setzt jedoch häufig auf unrealistischen Daten der Eigenfertigungsplanung auf und berücksichtigt die aktuelle Auftragsituation in der Produktion nicht oder nur unzureichend. Demgegenüber haben bestandsregelnde Auftragsfreigabeverfahren entscheidende Vorteile und stellen aus diesem Grund eine vielversprechende Alternative dar (LÖDDING 2008). Im vorliegenden Abschnitt werden die in der Praxis meist verbreiteten und in der Literatur häufig diskutierten, zentralen bestandsregelnden Auftragsfreigabeverfahren vorgestellt.

Constant Work In Process (ConWIP)

Die Auftragsfreigabe mittels ConWIP verfolgt das Ziel, den Umlaufbestand (WIP) auf einem konstanten Niveau (Anzahl an Aufträgen, Anzahl an Bauteilen oder Arbeitsvorrat in Vorgabestunden) zu halten. Dabei wird ein Auftrag für die Ausführung in der Produktion erst dann freigegeben, wenn der Umlaufbestand eine definierte Bestandsgrenze unterschreitet. Zur Umsetzung einer solchen Bestandsregelung werden in der Praxis meist sogenannte ConWIP-Karten eingesetzt, wobei die Anzahl der Karten in diesem Fall dem einzustellenden Umlaufbestand entspricht (SPEARMAN et al. 1989, LÖDDING 2008).

Dieses bestandsregelnde Verfahren erlaubt gut prognostizierbare Durchlaufzeiten und ist aufgrund weniger Verfahrensparameter einfach umzusetzen. Aus diesem Grund finden sich zahlreiche Anwendungen in der produzierenden Industrie. (LÖDDING 2008)

Engpass-Steuerung

Auftragsfreigabeverfahren, die unter der Engpass-Steuerung zusammengefasst werden (z. B. Optimized Production Technology (OPT)), basieren auf der Annahme, dass Auslastungsverluste an einem Engpass-Arbeitssystem zu Leistungsverlusten des gesamten Produktionsbereiches führen. Bei der Engpass-Steuerung wird ein Auftrag aus diesem Grund nur freigegeben, wenn das Engpass-Arbeitssystem einen Auftrag fertiggestellt hat. Dazu wird der zu steuernde Produktionsbereich in einen bestandsregulierten Bereich bis einschließlich zum Engpass-Arbeitssystem und einen nicht bestandsregulierten Bereich nach dem Engpass-Arbeitssystem unterteilt. Die Steuerung des bestandsregulierten Bereiches ist dabei mit der ConWIP-Steuerung vergleichbar. (SEIBOLD 2006, LÖDDING 2008)

Das Verfahren ist nur dann sinnvoll einsetzbar, wenn ein eindeutiges Engpass-Arbeitssystem vorhanden ist. Auch Weiterentwicklungen des Verfahren, die beispielsweise mehrere Engpass-Arbeitssysteme berücksichtigen, haben sich in der Praxis nur wenig durchgesetzt. (REINSCH 2002, SEIBOLD 2006)

Belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA) und Workload Control

Bei der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA), die vorwiegend in der Einzel- und Kleinserienfertigung Anwendung findet, wird in einem ersten Schritt mit einer Rückwärtsterminierung die sogenannte Liste dringender Aufträge ermittelt. In einem zweiten Schritt erfolgt die bestandsregelnde Freigabe dieser Aufträge, wenn an keinem der zu durchlaufenden Arbeitssysteme die jeweils definierte Belastungsschranke bzw. Bestandsgrenze überschritten ist. Jedes Arbeitssystem verfügt über ein Bestandskonto, eine Bestandsgrenze sowie einen Abzinsungsfaktor. Bei der Freigabe eines Auftrags erfolgt die Einbuchung der abgezinsten spezifischen Auftragszeiten auf die Bestandskonten und nach Abschluss der Bearbeitung entsprechend die Ausbuchung. Der Abzinsungsfaktor reduziert die zu buchenden arbeitssystemspezifischen Auftragszeiten entsprechend des aktuellen Auftragsfortschritts. Dadurch wirkt ein Auftrag auf die Bestandsgrenze eines Arbeitssystems umso weniger, desto später dieser voraussichtlich an dem betrachteten Arbeitssystem bearbeitet wird. Die arbeitssystemspezifische Auftragszeit wirkt also lediglich in vollem Umfang auf das Bestandskonto, an dessen Arbeitssystem der Auftrag gerade bearbeitet wird bzw. wartet. Ist an einem Arbeitssystem die Bestandsgrenze erreicht oder überschritten, so ist die Freigabe für alle Aufträge, die dieses System beanspruchen, blockiert. (BECHTE 1984, LÖDDING 2008)

Die BOA weist in der Regel eine periodische Auslösungslogik auf und verfügt damit über einen zeitlichen Abgleich der arbeitssystemspezifischen Belastung. Die Verfahrensregeln setzen eine konsequente Rückmeldung der Arbeitsvorgänge und damit eine elektronische Betriebsdatenerfassung voraus. In der industriellen Produktion sind einige Umsetzungen dieses Auftragsfreigabeverfahrens, vorwiegend im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung, bekannt. (WIENDAHL 1991, SEIBOLD 2006)

Das Auftragsfreigabeverfahren Workload Control entspricht in seiner Arbeitsweise der BOA, wenn auf eine Abzinsung der Auftragszeiten verzichtet wird. Folglich werden die Aufträge bei diesem Verfahren mit der vollständigen Auftragszeit in die Bestandskonten der Arbeitssysteme eingebucht. (LÖDDING 2008)

Dezentrale bestandsregelnde Auftragsfreigabeverfahren, wie beispielsweise das Steuerungsverfahren *Polca (Paired-Cell Overlapping Loops of Cards with Authorization)* und die *DBF (Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung)*, spielen für die vorliegende Arbeit nur eine untergeordnete Rolle und wer-

den aus diesem Grund nicht weiter detailliert. Für weiterführende Informationen sei an dieser Stelle z. B. auf SURI (1998) und LÖDDING (2001 & 2008) verwiesen.

4.2.2.2 Verfahren zur Reihenfolgebildung

Allgemeines

Die Reihenfolgebildung bestimmt denjenigen Auftrag in der Warteschlange vor einem Arbeitssystem, der als nächstes mit der Bearbeitung starten soll. Hierzu werden den wartenden Aufträgen in Abhängigkeit der angestrebten logistischen Zielgröße Prioritäten zugeordnet, wobei der Auftrag mit der höchsten Priorität am dringendsten eingestuft wird und somit als nächstes bearbeitet werden sollte. Dabei steigt der Einfluss der Reihenfolgebildung auf die Erreichung der logistischen Ziele mit dem Umlaufbestand bzw. mit der Anzahl wartender Aufträge vor dem Arbeitssystem. Aus diesem Grund ist die Reihenfolgebildung insbesondere für Produktionsumgebungen, die nach dem Werkstattprinzip organisiert sind, wichtig. (NYHUIS & WIENDAHL 2003, LÖDDING 2008)

Nach einer aktuellen Studie findet bei mehr als der Hälfte der befragten Unternehmen eine Reihenfolgebildung ausschließlich nach dem Liefertermin statt (SCHUH & STICH 2011). Für die Durchführung der Reihenfolgebildung im Rahmen der Produktionssteuerung existieren jedoch sehr viele weitere, vielversprechende Steuerungsverfahren, die in der Literatur diskutiert werden und in der Praxis mehr oder minder Anwendung finden. Diese Verfahren wirken in unterschiedlicher Weise auf die logistischen Zielgrößen, wobei auf die Termintreue einer Produktion durch die Reihenfolgebildung am meisten Einfluss genommen werden kann. Aufgrund der zunehmenden Bedeutung dieser Zielgröße (vgl. Abschnitt 2.3.2) werden im Rahmen dieser Arbeit primär Verfahren zur Reihenfolgebildung vorgestellt und diskutiert, die direkten Einfluss auf die Termintreue haben. Aufgrund der hohen Relevanz für die Praxis, insbesondere an Engpass-Arbeitssystemen, erfolgt im Anschluss eine Erläuterung der rüstzeitoptimierenden Reihenfolgebildung, die der Erhöhung der Auslastung an einem Arbeitssystem dient (vgl. Abschnitt 2.3.2). (LÖDDING 2008)

Terminorientierte Reihenfolgebildungsverfahren

First In - First Out (FIFO)

Das Steuerungsverfahren FIFO kann als natürliche Reihenfolgeregel bezeichnet werden und ist einfacher in der Praxis umzusetzen als andere Verfahren, da die Aufträge in der Reihenfolge bearbeitet werden, in der sie am jeweiligen Arbeitssystem eintreffen. Dadurch werden Reihenfolgevertauschungen vermieden und eine geringe Streuung der Durchlaufzeiten in der Produktion erzielt. Dies resultiert in einer guten Planbarkeit der Durchlaufzeiten, was sich positiv auf die Termin- und Liefertreue auswirkt. (NYHUIS & WIENDAHL 2003, LÖDDING 2008)

Frühester Plan-Starttermin (FPS)

Bei der Reihenfolgebildung nach dem FPS-Steuerungsverfahren erhält der Auftrag mit dem frühesten Plan-Starttermin die höchste Priorität zur Bearbeitung am jeweiligen Arbeitssystem. Das Verfahren setzt voraus, dass im Rahmen der Produktionsplanung Plan-Starttermine für alle Arbeitsvorgänge festgelegt und an die Mitarbeiter kommuniziert werden (z. B. über Auftragsbegleitpapiere), was in den meisten Unternehmen nicht erfolgt. (LÖDDING 2008)

Frühester Plan-Endtermin (FPE)

Das Steuerungsverfahren FPE erteilt dem Auftrag mit dem frühesten Plan-Endtermin die höchste Priorität zur Bearbeitung am Arbeitssystem. Dieses Verfahren ist dem FPS-Verfahren sehr ähnlich. Bei der Terminierung gegen eine unbegrenzte Kapazität, ist das FPE-Verfahren im Hinblick auf die Termintreue jedoch zu bevorzugen, da Aufträge mit identischen Plan-Endterminen und unterschiedlichen Bearbeitungszeiten, im Gegensatz zu FPS, gleich priorisiert werden. Ein weiterer Vorteil des FPE-Verfahrens ist die aufwandsärmere industrielle Umsetzung, da die Plan-Endtermine der Arbeitsvorgänge in der Regel bekannt und auf den Auftragspapieren bereits ausgewiesen sind. (LÖDDING 2008)

Schlupfzeitregelung

Bei der Schlupfzeitregelung erfolgt die Priorisierung der wartenden Aufträge an einem Arbeitssystem nach der auftragspezifischen Schlupfzeit, d. h. der Auftrag mit der kleinsten Schlupfzeit erhält die höchste Priorität. Bei der *Schlupfzeit S* eines Auftrags handelt es sich um die Zeitdauer zwischen dem Plan-Fertigstellungstermin und einem Planungszeitpunkt abzüglich der benötigten Bearbeitungs- und etwaigen Mindestübergangszeiten. Dieses Steuerungsverfahren zielt auf die Berücksichtigung von möglichen zukünftigen Störungen oder Verzögerungen im Rahmen der Reihenfolgebildung ab, denn unvorhergesehene Ereignisse führen bei Aufträgen mit geringem Schlupf eher zu einer nicht termintreuen Fertigstellung als bei Aufträgen mit einem hohen Schlupf. Ein Nachteil der Schlupfzeitregelung sind jedoch regelmäßige Reihenfolgevertauschungen und damit Planabweichungen, da ein Auftrag direkt nach der Auftragsfreigabe über einen hohen Schlupf verfügt und deshalb solange niedrig priorisiert wird, bis ein Großteil der Schlupfzeit verstrichen ist. Im späteren Verlauf des Auftragsdurchlaufs gewinnt der Auftrag aufgrund des abnehmenden Schlupfes an Priorität und wird entsprechend beschleunigt bzw. vorgezogen. Ein großer Anteil der Reihenfolgevertauschungen sorgt somit lediglich für den Ausgleich vorher durchgeführter Reihenfolgeänderungen, wobei dieser Effekt insbesondere in Produktionsumgebungen mit hoher Materialflusskomplexität (z. B. Werkstattfertigung) auftritt. (LÖDDING 2008)

Die Tatsache, dass ein Auftrag direkt nach der Auftragsfreigabe einen hohen Schlupf besitzt und deshalb niedrig zur Bearbeitung an einem Arbeitssystem priorisiert wird bis der Großteil der Schlupfzeit ungenutzt verstrichen ist, greifen LEE et al. (1993) auf und schlagen eine Verteilung der Schlupfzeit auf die einzelnen Arbeitssysteme vor. Sofern die Belastung der Arbeitssysteme bekannt ist, sollte diese zur *Schlupfzeitverteilung* genutzt werden. Andernfalls empfehlen die Autoren eine gleichmäßige Verteilung, ohne diese genauer zu spezifizieren. SCHUH et al. (2007) sehen in dem Konzept der Schlupfzeitverteilung eine vielversprechende Möglichkeit, um einem Arbeitssystem zeitliche Freiheitsgrade für die lokale Selbstoptimierung zu schaffen, ohne dabei mit den globalen logistischen Zielvorgaben zu konkurrieren. Die Autoren detaillieren die Verteilungslogik aber nicht weiter. STÜRMANN (2012) fasst einzelne Arbeitssysteme strukturiert zu Modulen zusammen (vgl. Abschnitt 4.2.4) und weist diesen Schlupfzeitanteile zu. Die Verteilung der Schlupfzeit auf die einzelnen Module erfolgt hierbei nach den verbleibenden Übergangszeiten der einzelnen Arbeitssysteme in einem Modul. LOPITZSCH (2005), der ebenfalls eine Modularisierung von Arbeitssystemen vorschlägt, verteilt die zur Verfügung stehende Schlupfzeit über die Anzahl der in einem Modul verbleibenden Arbeitsvorgänge.

Auslastungsorientierte rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung

Die Grundidee dieses Steuerungsverfahrens ist die Reduzierung der nicht-wertschöpfenden Rüsttätigkeit durch die Reihenfolgebildung. Hierzu müssen auftragspezifische Rüstzeiten vorliegen, die, zumindest bei einem Teil der Aufträge, reihenfolgeabhängig sind. Bei der rüstzeitoptimierenden Reihenfolgebildung werden diejenigen Aufträge vor einem Arbeitssystem hoch priorisiert, die ausgehend von dem gerade bearbeiteten Auftrag geringe Rüsttätigkeiten verursachen und somit eine geringe Rüstzeit haben. So kann die verfügbare Kapazität an einem Arbeitssystem erhöht werden, was im Falle eines Engpass-Arbeitssystems den Ablauf der gesamten Produktion positiv beeinflussen kann. Aus diesem Grund ist die rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung für Engpass-Arbeitssysteme besonders relevant. Falls durch dieses Steuerungsverfahren Rückstand abgebaut wird, kann die rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung sogar indirekt einen positiven Beitrag zur Erhöhung der Termintreue leisten. Eine allzu große Verzögerung von Aufträgen mit hohem Umrüstaufwand muss jedoch durch geeignete Maßnahmen, wie beispielsweise eine Mindestauflagehäufigkeit jeder Rüstgruppe (z. B. täglich), verhindert werden. Außerdem verursacht das Verfahren durch einen erhöhten Umlaufbestand einen zusätzlichen Steuerungsaufwand sowie längere und stärker streuende Auftragsdurchlaufzeiten, was den Vorteilen der Rüstzeitminimierung und damit der Kapazitätserhöhung kritisch gegenübergestellt werden sollte. (LÖDDING 2008)

4.2.2.3 Verfahren zur Kapazitätssteuerung

Allgemeines

Während im Zuge der Kapazitätsplanung das erforderliche Kapazitätsangebot zur Erfüllung eines Produktionsprogrammes im Voraus bestimmt wird, entscheidet die Kapazitätssteuerung, welche in den meisten Unternehmen nur mangelhaft ausgeübt wird, kurzfristig über den tatsächlichen Einsatz der zur Verfügung stehenden Kapazitäten. Die Aufgabe der Kapazitätssteuerung ist es somit, über den Einsatz von Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität (vgl. Abschnitt 2.2.6) zu entscheiden, um das logistische Ziel einer hohen Termintreue der Arbeitssysteme zu erfüllen. Hierzu steht insbesondere die Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter zur Verfügung, welche sich beispielsweise über deren Arbeitszeitflexibilität und Mehrfachqualifikation ausdrückt. Maßnahmen, die die Kapazitätsflexibilität über die Betriebsmittel erhöhen, sind in der Regel nur schwer kurzfristig umzusetzen. Hierzu zählen beispielsweise die Veränderung der Anzahl an Betriebsmitteln und die Fremdvergabe von Aufträgen bzw. Arbeitsvorgängen. (LÖDDING 2008)

Steuerungsverfahren zur Kapazitätssteuerung

Rückstandsregelung

Der Einsatz der Rückstandsregelung bietet sich in Produktionsumgebungen und an Arbeitssystemen an, an denen die Möglichkeit zur kurzfristigen Kapazitätsanpassung besteht. Dieses Steuerungsverfahren basiert auf der Messung des Rückstands. Diese sogenannte Rückstandsmessung hat die Aufgabe, den Rückstand eines Arbeitssystems oder einer Produktionsumgebung kurzfristig, exakt und mit möglichst geringem Aufwand zu ermitteln. Der Rückstand zu einem bestimmten Zeitpunkt kann dabei über die Differenz von Plan-Abgang und Ist-Abgang an einem Arbeitssystem bzw. in einer Produktionsumgebung beschrieben werden. Auf Basis des aktuellen Rückstands können die Kapazitäten über die Vorgabewerte der Produktionsplanung angepasst werden, wenn der Ist-Abgang der Produktion hinter den Plan-Abgang zurückfällt und umgekehrt (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die Umsetzung der Rückstandsregelung erscheint im Vergleich zu anderen Verfahren der Kapazitätssteuerung vergleichsweise einfach, setzt jedoch als notwendige Grundlage den Einsatz einer effektiven und effizienten Betriebsdatenerfassung voraus. (PETERMANN 1996, BREITHAUPT 2001, LÖDDING 2008)

Planorientierte Kapazitätssteuerung

Ziel der Planorientierten Kapazitätssteuerung ist die Anpassung der Ist-Kapazität an die Plan-Kapazität unter Einsatz kurzfristiger kapazitiver Maßnahmen (vgl. Rückstandsregelung). Die Regelgröße bei diesem Steuerungsverfahren ist somit nicht der Rückstand, sondern die Kapazitätsabweichung als Differenz zwischen Plan-Kapazität und Ist-Kapazität. Für die situationsbasierte Produktionssteue-

zung, welche Steuerungsentscheidungen auf Basis der aktuellen Auftragsituation freigegebener Produktionsaufträge trifft, hat dieses Steuerungsverfahren somit keine direkte Bedeutung. (LÖDDING 2008)

Terminorientierte Kapazitätssteuerung (TKS)

Im Rahmen der Terminorientierten Kapazitätssteuerung wird die Erhöhung der logistischen Zielgröße Termintreue angestrebt. Hierzu wird die voraussichtliche Terminabweichung von Aufträgen an einem Arbeitssystem berechnet und eine Kapazitätserhöhung durchgeführt, wenn die Verspätung eines Auftrags dadurch vermieden oder vermindert werden kann. Aufgrund des Fokus der TKS auf die Prognose von voraussichtlichen Terminabweichungen von Aufträgen sowie der untergeordneten Bedeutung der aktuellen Auftragsituation bei der Ausführung der Steuerungsentscheidungen, wird die TKS bei der Entwicklung des Systems zur situationsbasierten Produktionssteuerung nicht weiter berücksichtigt. (BEGEMANN 2005, LÖDDING 2008)

4.2.3 Adaptive Ansätze zur Produktionssteuerung

WIEGERSHAUS (1990) beschäftigt sich mit einer Methode zur Synchronisation von heterogenen Fertigungsstrukturen in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Er fokussiert dabei im Speziellen auf die Integration flexibler Fertigungssysteme (FMS) in konventionelle Produktionsumgebungen kleiner und mittlerer produzierender Unternehmen. Die von LOPITZSCH (2005) entwickelte Segmentierte Adaptive Fertigungssteuerung (SAPCO) beschreibt ein hybrides Auftrags erzeugungsverfahren für die variantenreiche Serienproduktion, welches im Falle einer auftragsbezogenen Produktion der Produktionsplanung zugeordnet werden kann. Dieses Verfahren baut auf einer Modularisierung der Produktion auf und kombiniert die beiden Auftrags erzeugungsverfahren MRP und Kanban zur Generierung von Produktionsaufträgen. Die eigentlichen Aufgaben der Produktionssteuerung werden im Rahmen der SAPCO dezentral innerhalb des Moduls ausgeführt, um steuerungsbezogen eigenständige Module zu schaffen. SEIBOLD (2006) baut auf dieser Arbeit auf und entwickelt eine Methodik zur Konfiguration hybrider Verfahren zur Fertigungssteuerung in der Großserienproduktion.

STÜRMAN (2012) führt den Modularisierungsgedanken weiter und entwickelt ein Konzept zur Montagesynchronen Auftragssteuerung. Dieses umfasst neben den eigentlichen Aufgaben der Produktionssteuerung die Auftrags erzeugung sowie die Materialsteuerung. Der Fokus dieses Konzepts ist die synchrone Steuerung von Aufträgen in den Materialversorgungsprozessen für die Montage. Der sogenannte ganzheitliche Synchronisationsansatz umfasst hierbei sowohl die horizontale Synchronisation zwischen Fertigung und Montage als auch die vertikale montageorientierte Synchronisation der Fertigungsprozesse untereinander. Die adressierten Ziele der Montagesynchronen Auftragssteuerung sind die Kom-

pensation von Störungsauswirkungen, die Flexibilitätssteigerung hinsichtlich Veränderungen im Auftragsdurchlauf sowie die vorausschauende Fehlteilvermeidung in der Montage. Dieser Steuerungsansatz ist einer der ersten, der versucht, die Idee von synchronisierten Produktionsabläufen, die mit den Prinzipien der schlanken Produktion im Bereich der Großserienproduktion bereits erfolgreich umgesetzt werden konnte, auf die Einzel- und Kleinserienfertigung zu übertragen (TAKEDA 2009, STÜRMANN 2012). Dennoch erfordert die Montagesynchrone Auftragssteuerung, im Vergleich zu den Umsetzungen im Bereich der Großserienproduktion, einen erheblichen Informationsaustausch, für den u. a. die RFID-Technologie vorgeschlagen wird. Darüber hinaus ruft dieser Steuerungsansatz erhebliche Koordinations- und Berechnungsaufwände hervor.

FUCHS (2013) schafft in seiner Arbeit ein Erklärungsmodell zur wertstromorientierten Gestaltung der Auftragsfreigabe, die in der Lage ist, dynamische Engpässe in der Einzel- und Kleinserienfertigung zu berücksichtigen. Dabei erfolgt primär die Erarbeitung eines Ansatzes zur Auslegung und Konfiguration der wertstromorientierten Auftragsfreigabe. Die Konzeption eines Steuerungsverfahrens steht dabei nicht im Fokus. Darüber hinaus erfolgt die Entwicklung von Maßnahmen und Methoden für eine verbesserte Prognosefähigkeit und Bewertung von Planungsunsicherheiten.

Aufbauend auf der Erkenntnis, dass die klassischen Ansätze zur PPS die aktuelle Produktionsituation nur unzureichend berücksichtigen, wurde der Ansatz der Produktionsregelung, welche ein permanentes Erfassen und Aufbereiten von Ist-Werten aus der Produktion voraussetzt, entwickelt. Die Produktionsregelung basiert auf den Prinzipien der Regelungstechnik und wird als Weiterentwicklung der auf Plangrößen basierenden PPS zu einer auf die aktuelle Produktionssituation reagierenden Regelung des Auftragsdurchlaufs verstanden (WIENDAHL et al. 1993, MARTIN 1998). Hierbei wird die Analogie zur Regelungstechnik über eine Kaskadenregelung geschaffen, bei der unterschiedlich geartete Regler, beispielsweise für Kapazität und Bestand eines Produktionssystems, eingesetzt werden (WIENDAHL et al. 1993, MARTIN 1998, PRITSCHOW & BRINZER 2002, BRINZER 2005). Diese Regler und deren Regelungsprinzipien basieren auf statischen und dynamischen Modellen, die sich für die Aufgaben der Produktionsplanung relativ einfach, z. B. unter Einsatz des Trichtermodells, bestimmen lassen (WIENDAHL et al. 1993). Da die situationsbasierte Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung von unvorhergesehenen Ereignissen und zufälligen Störungen geprägt ist, sind zur Erstellung von verwertbaren Modellen beispielsweise Markow-Ketten, Fuzzy-Logik, nicht-lineare regelbasierte Algorithmen oder Agentensysteme notwendig (WIENDAHL et al. 1993, MARTIN 1998, BRINZER et al. 2005). Aufgrund der gesteigerten Komplexität sowie dem bestehenden Forschungs- und Umsetzungsbedarf der Produktionsregelung im kurzfristigen, steuernden Bereich (PRITSCHOW & BRINZER 2002, BRINZER et al. 2005), liegen die aktuellen Anwendungsmöglichkeiten der Produktionsregelung eher auf mittelfristigen, pla-

4.2 Ansätze zur Steuerung von Produktionsabläufen

nenden Tätigkeiten, wie beispielsweise einer situationsbezogenen Maschinenbelegungsplanung.

Zur zielgerichteten Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung ist, wie in Abschnitt 2.4.2 ausführlich beschrieben, ein effizientes Informationsmanagement sowie die Bereitstellung aussagekräftiger Daten über die aktuelle Produktionssituation notwendig, wofür sich der Einsatz moderner IuK-Technologien, wie z. B. die RFID-Technologie, eignet (MÜLLER 2004, HUANG et al. 2011, OSTGATHE 2012, REINHART et al. 2013a, PHILIPP 2014). Nachfolgend wird eine Auswahl an adaptiven Ansätzen zur RFID-basierten und sensorgestützten Steuerung von Abläufen in der Produktion dargestellt.

Die physische Kombination von Produkten oder Bauteilen mit einer Identifikationstechnologie (z. B. RFID-Transponder) erlaubt die Einführung sogenannter intelligenter Produkte, die nach SCHOLZ-REITER & FREITAG (2007) die Grundlage autonomer Objekte in Produktion und Logistik darstellen und die gemäß einer aktuellen Studie des Fraunhofer IAO in zukünftigen Produktionsumgebungen eine immer wichtigere Rolle spielen werden (SPATH et al. 2013a). ZBIB et al. (2008) definieren in diesem Kontext vier Klassen von intelligenten Produkten (vgl. Abbildung 10).

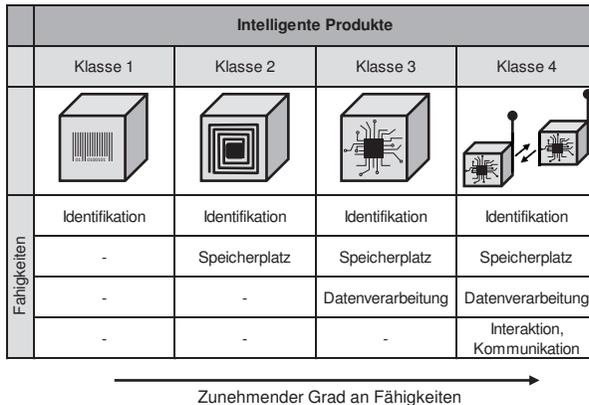


Abbildung 10: Klassen eines intelligenten Produktes (ZBIB 2008, OSTGATHE 2012, REINHART et al. 2013c)

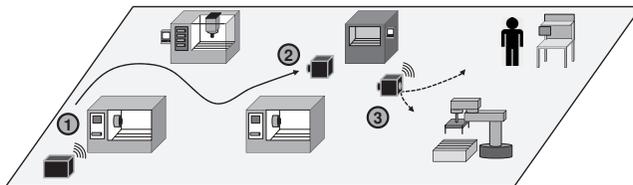
Danach verfügt ein intelligentes Produkt der ersten Klasse lediglich über eine eindeutige Identifikationsnummer (z. B. Barcode), während intelligente Produkte der zweiten Klasse zusätzlich einen Datenspeicher aufweisen, auf den lesend und schreibend zugegriffen werden kann (z. B. RFID). Wird ein Produkt der dritten Klasse zugeordnet, so besitzt dieses zudem die Fähigkeit, die gespeicherten Daten zu verarbeiten und darauf basierend Entscheidungen abzuleiten. Ist ein intelligentes Produkt darüber hinaus in der Lage, selbstständig mit der Umwelt zu

4 Stand der Forschung und Technik

kommunizieren und zu interagieren, so lässt es sich der vierten Klasse zuordnen (ZBIB et al. 2008).

Hieraus ergeben sich drei, aufeinander aufbauende Nutzenkategorien intelligenter Produkte in einer Produktionsumgebung, die HUANG et al. (2009), OSTGATHE (2012) und REINHART et al. (2013a) folgendermaßen zusammenfassen (vgl. Abbildung 11):

1. Automatische Objektidentifikation (z. B. Produkte) sowie Datenerfassung und -bereitstellung zur Schaffung geschlossener Informationskreisläufe.
2. Effiziente Verfolgung und Rückverfolgung (Tracking & Tracing) von Produktionsaufträgen für eine zielgerichtete Erfassung des Umlaufbestandes und damit der aktuellen Situation freigegebener Aufträge in der Produktion.
3. Adaptive Planung und Steuerung von Abläufen in der Produktion.



Legende:

- ① Automatische Objektidentifikation und Datenerfassung
- ② Verfolgung und Rückverfolgung von Produktionsaufträgen
- ③ Adaptive Planung und Steuerung von Produktionsabläufen

Abbildung 11: Nutzenkategorien intelligenter Produkte (OSTGATHE 2012)

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. Im Speziellen wurden verschiedene Lösungsansätze für eine RFID-basierte Verfolgung freigegebener Aufträge in der Produktion und deren Integration in betriebliche Planungs- und Steuerungssysteme vorgestellt (z. B. HUANG et al. 2007, QIU 2007, ZHOU et al. 2007, HUANG et al. 2008b). Darüber hinaus wurde ebenfalls in einigen Arbeiten das Nutzenpotenzial einer dezentralen Datenspeicherung auf einem RFID-Transponder diskutiert (z. B. QIU 2007, OSTGATHE 2012).

Das Konzept einer RFID-basierten Auftragsverfolgung greifen POON et al. (2007) und KOIKE et al. (2008) auf und nutzen dieses zur Auftragsüberwachung sowie zur frühzeitigen Identifikation von Planabweichungen. POON et al. (2007) haben hierzu ein Assistenzsystem entwickelt, welches mögliche Störungen im Produktionsverlauf auf Basis mathematischer Auswertungen (z. B. Berechnung

der Ist-Durchlaufzeit von Aufträgen) frühzeitig erkennt und diese an die relevanten Mitarbeiter bzw. Produktionsbereiche kommuniziert. KOIKE et al. (2008) realisieren einen betriebsparallelen Abgleich des aktuellen Auftragsfortschritts mit den ursprünglichen Planungsdaten und nehmen, falls vorab definierte Toleranzwerte überschritten werden, eine dynamische Umplanung der Auftragslosgrößen vor, um die logistischen Zielvorgaben zu erreichen. Im Fokus der beiden Ansätze steht die frühzeitige Reaktion auf mögliche Störungen im Produktionsverlauf, wobei die Nutzung der aktuellen Auftragsinformationen für eine situationsbasierte Produktionssteuerung im Rahmen dieser Arbeiten nicht vorgesehen ist. (OSTGATHE 2012)

Die Realisierung einer adaptiven Planung und Steuerung von Produktionsabläufen mit Hilfe der RFID-Technologie und somit intelligenter Produkte der zweiten Klasse lässt sich durch deren Integration in Multiagentensysteme (MAS) ermöglichen. Die MAS besitzen die Fähigkeiten der Klasse 3 und 4 und erlauben somit die selbständige Informationsaufnahme und -verarbeitung, Entscheidungsfindung und -durchsetzung sowie Interaktion einzelner Objekte in der Produktion, was die Grundlage der Selbststeuerung darstellt (MCFARLANE et al. 2003, BÖSE & WINDT 2007, OSTGATHE 2012, BLUNCK & WINDT 2013).

Der Selbststeuerungsansatz wird u. a. im Rahmen des Sonderforschungsbereiches (SFB) 637 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (Selbststeuerung logistischer Prozesse - Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen) erforscht und als vielversprechend im Hinblick auf die Reduktion der Störungsanfälligkeit und Vereinfachung von Logistikabläufen eingestuft. Produkte werden durch ihre softwarebasierten Agenten, die mit anderen Produkt- und Ressourcenagenten kommunizieren und verhandeln, in die Lage versetzt, selbstständig und unter Berücksichtigung der individuellen Zielsetzungen den eigenen Weg durch das Produktionssystem festzulegen und diesen mit anderen Elementen der Produktion abzustimmen (SCHOLZ-REITER & HÖHNS 2006, BÖSE & WINDT 2007). Der Fokus im Rahmen des SFB 637 liegt auf der Erarbeitung theoretischer Grundlagen zum Thema Selbststeuerung und dabei insbesondere auf den überbetrieblichen Abläufen der Logistik (OSTGATHE 2012).

In den Forschungsarbeiten von LIU et al. (2005), HIGUERA & MONTALYO (2007) und HUANG et al. (2008a) werden u. a. Produkte mit einem RFID-Transponder ausgestattet und in Multiagentensysteme (MAS) bzw. bei MCFARLANE et al. (2003) in ein Holonic Manufacturing System (HMS) integriert. Hierbei wird jedem Produkt ein Auftrags- bzw. Produktagent zugeordnet, um im Falle einer etwaigen Maschinen- bzw. Ressourcenstörung Umplanungen auf Alternativsysteme, die dem jeweiligen Software-Agenten bekannt sind, vornehmen zu können. Die RFID-Technologie dient zur Identifikation der Produkte, darauf aufbauend dem Abrufen entsprechender Arbeitsvorgänge am Arbeitssystem sowie der Aktualisierung des Auftragsstatus nach der Bearbeitung. Eine situationsbezogene

4 Stand der Forschung und Technik

Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung sowie eine Synchronisierung von Produktionsabläufen durch die Bereitstellung auftrags- bzw. produkt-spezifischer Informationen sind in den betrachteten Arbeiten nicht vorgesehen.

OSTGATHE (2012) entwickelt 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 entwickelt, welches sämtliche Daten, die zur Steuerung von Produktionsabläufen relevant sind, strukturiert abbildet (vgl. Abschnitt 4.4.2). Darauf aufbauend entwickelt 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.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes „SoPro“ (Selbstorganisierende Produktion) werden durch den Einsatz sogenannter Process-eGrains intelligente Produkte der vierten Klasse in der Produktion genutzt, um Methoden für eine selbstorganisierende Produktion zu entwickeln. Process-eGrains sind robuste, miniaturisierte Funksensorknoten mit einer eigenen Energieversorgung, mit welchen Produkte und Ressourcen eines Produktionssystems ausgestattet werden. Diese Mikrosysteme verfügen über eine eigene Recheneinheit und sind in der Lage, Daten dezentral aufzunehmen, zu speichern, zu verarbeiten und zu kommunizieren. Auf dieser Basis lässt sich zwischen den einzelnen Produkten und Ressourcen ein Kommunikationsnetzwerk aufbauen, welches zusammen mit einem integrierten Multiagentensystem zur selbstorganisierenden, dezentral koordinierten und zustandsbezogenen Erfüllung der Aufgaben der Ablaufplanung dient (z. B. Anpassung des Produktionsablaufs bei Ressourcenstörungen) (CHEMNITZ et al. 2010, OSTGATHE 2012, SOPRO 2013, UHLMANN et al. 2013). Eine situationsbezogene Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung unter Berücksichtigung des aktuellen Auftragsfortschritts steht in dem vorgestellten Projekt „SoPro“ nicht im Fokus.

Der Sonderforschungsbereich 653 „Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus“ strebt die Aufhebung der physikalischen Trennung zwischen Bauteilen und bauteilspezifischen Informationen an. Der Begriff „Gentelligenz“ setzt sich aus den beiden Termini „Genetik“ und „Intelligenz“ zusammen. Unter Intelligenz wird in diesem Zusammenhang die Fähigkeit verstanden, mit Hilfe von geeigneten Werkstoffen und Sensoren, relevante Daten (z. B. Kräfteinflüsse) während des Herstellungsprozesses und der Nutzungsphase aufzunehmen, zu verarbeiten und diese inhärent auf dem Bauteil zu speichern (OSTGATHE 2012). Die Genetik adressiert wiederum die Möglichkeit, die gespeicherten Informationen über den gesamten Lebenszyklus zu erhalten und an nachfolgende Produktgenerationen

weiterzugeben (DENKENA et al. 2005, NYHUIS et al. 2008, OSTGATHE 2012, DENKENA et al. 2013). Der Schwerpunkt liegt auf der technischen Realisierung dieser gentelligenten Bauteile bzw. Technologie. NYHUIS et al. (2009) entwickeln im Rahmen des Projektes ein bauteilbasiertes Steuerungsverfahren zur Reihenfolgebildung in der Montage mit dem Ziel synchroner Produktionsabläufe. DENKENA et al. (2012 & 2013) beschreiben einen Ansatz zur Fertigungsplanung und -steuerung mit gentelligenten Bauteilen, wobei der Fokus dabei auf der bauteilhärenten Speicherung des Arbeitsplans, dessen Durchsetzung und etwaigen Adaption liegt. Die Ausführung der Aufgaben Auftragsfreigabe und Kapazitätssteuerung durch die Kommunikation bzw. den Abgleich bauteilspezifischer Informationen wird innerhalb des SFB 653 nicht adressiert.

Im Zuge der Forschungsinitiative „Industrie 4.0“ (KAGERMANN et al. 2013) fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) die drei Projekte „ProSense“ (Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik), „KapaflexCy“ (Selbstorganisierte Kapazitätsflexibilität unter Einsatz Cyber-Physischer Systeme) und „CyProS“ (Cyber-Physische Produktionssysteme). „ProSense“ fokussiert, als Fortführung der Forschungsansätze des High Resolution Production Managements (SCHUH et al. 2007, SCHUH et al. 2011), eine hochauflösende Produktionssteuerung durch den Einsatz sogenannter Cyber-Physischer Systeme (CPS) in der Produktion (LANZA et al. 2013). Das Ziel ist die Entwicklung eines Feinplanungssystems, welches in der Lage ist, Inkonsistenzen und schlechte Qualität in der zur Verfügung stehenden Datenbasis zu beherrschen. Daten und dadurch generiertes Wissen werden in diesem System effizient, im Sinne der Massendatenverarbeitung, verwaltet. Gleichzeitig soll das Feinplanungssystem Abweichungen der Produktion von der Planung und zuverlässige Prognosen über die zukünftige Produktionssituation aufzeigen sowie über intuitive Benutzerschnittstellen verfügen (SCHUH et al. 2013). „KapaflexCy“ verfolgt das Ziel, Werkzeuge, Methoden und Regeln für eine selbstorganisierte Kapazitätsflexibilität bereitzustellen. Dabei sollen Unternehmen befähigt werden, den Einsatz ihrer Produktionskapazitäten unter direkter Beteiligung und dezentraler Abstimmung der ausführenden Mitarbeiter hochflexibel und kurzfristig zu steuern, beispielsweise durch den Einsatz mobiler Endgeräte (SPATH et al. 2013b). Im Rahmen von „CyProS“ erfolgt die Schaffung von Basistechnologien (z. B. Referenzarchitektur), einem repräsentativen Spektrum von CPS (z. B. intelligente Maschinenkomponenten) und Einführungsstrategien (z. B. interaktive Handbücher) als Grundlage eines Cyber-Physischen Produktionssystems. Darüber hinaus erfolgt die Entwicklung von Methoden zur Planung und Steuerung von Abläufen in Produktion und Logistik sowie die Umsetzung von Cyber-Physischen Produktionssystemen in Demonstrationsplattformen sowie industriellen Produktionsumgebungen (REINHART et al. 2013c). Im Rahmen von „CyProS“ erfolgt im Speziellen die Entwicklung situationsbasierter Ansätze für die PPS, worauf im Rah-

men der vorliegenden Arbeit bei der Entwicklung von Steuerungsverfahren für eine situationsbasierte Produktionssteuerung aufgebaut werden kann.

4.2.4 Ansätze zur Modularisierung in der Produktion

Zur Beherrschung der steigenden logistischen Komplexität in der Produktion wird in der Literatur der Ansatz der Produktionsstrukturierung vorgeschlagen und diskutiert. Unter einer Produktionsstrukturierung wird die Bildung von Segmenten bzw. Modulen in der Produktion verstanden, um die Koordinations- und Abstimmungsaufwände sowie Schnittstellen zwischen den einzelnen Unternehmenseinheiten zu reduzieren (HÖGE 1995, WILDEMANN 1998). Wenn sogenannte Produktfamilien mit ähnlichen Produktstrukturen jeweils einem Produktionsmodul zugeordnet werden, können mit Hilfe dieser produktorientierten Modularisierung Vorteile der Fließ- und Werkstattfertigung vereint werden (vgl. Abschnitt 2.2.3) (SCHUH & SCHMIDT 2006, WIENDAHL 2010). Im Rahmen dieser Arbeit werden die Begriffe „Modul“ und „Modularisierung“ gewählt, da der Modulbegriff allgemein als eine Untereinheit eines ganzen Systems (hier: Produktionssystem) verstanden wird und somit eine abstrakte Bezeichnung für ein vereinheitlichtes Subsystem darstellt (STÜRMANN 2012). HÖGE 1995 benennt zwei wesentliche Prozessschritte bei der Modularisierung in der Produktion: die Entkopplung und die Harmonisierung. Unter der Entkopplung wird die Abkapselung eines einzelnen, eigenständigen Subsystems vom Gesamtsystem verstanden, während mit der Harmonisierung die Einrichtung von Standards adressiert wird, die in möglichst vielen Modulen durchgesetzt werden können. Hierdurch kann die Vielzahl an Elementen (Produkte, Ressourcen etc.) in der Produktion strukturiert und die Anzahl der Beziehungen zwischen diesen stark reduziert werden, weshalb die Modularisierung im Bereich der Fabrikplanung als einer der wesentlichen Wandlungsbefähiger erachtet wird (HERNÁNDEZ 2003, SCHENK et al. 2014). Zur Erreichung der notwendigen hohen Flexibilität und damit verbundenen hohen Reaktionsfähigkeit gilt die Modularisierung von Produktionsabläufen allgemein in vielen Forschungsarbeiten als ein vielversprechender Lösungsansatz (GECK-MÜGGE & WIEDENMANN 1993, WIEDENMANN 2001, GRUNWALD 2002, MÜLLER 2008, OSTGATHE 2012).

Im Rahmen der PPS wird die Modularisierung meist im Kontext mehrstufiger Planungs- und Steuerungskonzepte genannt. Dabei erfolgen die Planungs- und Steuerungsentscheidungen modulübergreifend unter Einsatz eines zentralen PPS-Systems. Dieses bestimmt die Rahmenbedingungen (z. B. Arbeitspläne) und Ziele (z. B. Termine) für den Produktionsablauf, welche den dezentralen Modulen, die auch als Steuerbereiche bezeichnet werden, vorgegeben werden. Die Feinplanung und -steuerung sowie der Umgang mit unvorhergesehenen Ereignissen erfolgt autonom auf der Modulebene, z. B. über den Meister. So können innerhalb des Moduls Freiheitsgrade geschaffen werden, die die Möglichkeit zur

Selbstoptimierung zulassen. Die Verfahren zur Ausführung der verschiedenen Planungs- und Steuerungsaufgaben unterscheiden sich im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeiten, jedoch erfolgt die Modularisierung zur Produktionsstrukturierung meist ausschließlich produktorientiert (WILDEMANN 1998, ROHLOFF 1995, HAUERTMANN 1998, LOPITZSCH 2005). STÜRMAN (2012) greift diese Tatsache auf und entwickelt einen der ersten Modularisierungsansätze aus Sicht der Produktionssteuerung mit dem Ziel einer montagesynchronen Auftragssteuerung. Dabei erfolgt die Bildung der sogenannten Prozessmodule auf der Basis von prozessbezogenen, ressourcenbezogenen, auftragsbezogenen und zeitbezogenen Entscheidungskriterien. Die Prozessmodule, welche logisch zusammenhängende Teilprozessketten einzelner Bauteile bzw. Produkte umfassen, dienen der Definition von Synchronisationspunkten als Grundlage des entwickelten Steuerungskonzeptes. Eine hohe Materialflusskomplexität und eine produktfamilienübergreifende Nutzung von einzelnen Arbeitssystemen, vor allem in nach dem Verrichtungsprinzip organisierten Produktionsumgebungen, werden im Rahmen des vorgeschlagenen Modularisierungsansatzes jedoch nur randständig betrachtet. Aufgrund der Forderung nach Flexibilität und Adaptierbarkeit (vgl. Kapitel 3) müssen bei der Entwicklung eines Modularisierungsansatzes für eine situationsbasierte Produktionssteuerung sowohl eine produkt- und ressourcenorientierte als auch eine steuerungorientierte Modularisierung Berücksichtigung finden.

4.2.5 Zwischenfazit

Im vorliegenden Abschnitt wurden in einem ersten Schritt konventionelle Verfahren zur Ausführung der Steuerungsaufgaben Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung vorgestellt und diskutiert (vgl. Abschnitt 4.2.2). Dabei wurde festgestellt, dass die Auftragsfreigabe in der Praxis häufig direkt mit dem Abschluss der Produktionsplanung oder nach einem vorgegebenen Freigabetermin erfolgt. Dies bedeutet, dass selten eine Ereignisorientierung bzw. eine Berücksichtigung der aktuellen Produktionssituation vorliegt, was jedoch die Grundlage vieler verfügbarer Steuerungsverfahren darstellt (LÖDDING 2008). Ähnliches gilt für die Reihenfolgebildung, die bei vielen Unternehmen ausschließlich auf Basis des Liefertermins durchgeführt wird. Vielversprechende, terminorientierte Verfahren zur Reihenfolgebildung, wie vor allem die Schlupfzeitregelung, finden in der Praxis nur selten Anwendung (SCHUH & STICH 2011). Ein Grund hierfür ist die fehlende Datenverfügbarkeit sowie die mit der Schlupfzeitregelung verbundenen häufigen Reihenfolgevertauschungen. Bestehende Ansätze zur Verteilung und damit effektiveren Nutzung der Schlupfzeit weisen über keine produktionssystemspezifischen Verteilungsmechanismen (z. B. Berücksichtigung modulspezifischer Termintreue) auf. Darüber hinaus verfügen produzierende Unternehmen häufig über eine ungleichmäßige Kapazitätsauslastung (SCHUH & STICH 2011).

Wie in Abschnitt 1.2 dargestellt, wurde die Notwendigkeit von rückgemeldeten Echtzeit-Informationen für die zielgerichtete Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung in der produzierenden Industrie erkannt, jedoch stehen leistungsfähige Systeme zur Betriebsdatenerfassung in den Unternehmen nur selten zur Verfügung. Die Abschnitte 2.4.3 und 4.2.3 haben verdeutlicht, dass die RFID-Technologie eine vielversprechende und in Forschungsarbeiten häufig vorgeschlagene Möglichkeit zur Schaffung einer hohen Informationstransparenz in der Produktion und somit zur situationsbasierten Ausführung von Steuerungsverfahren darstellt. Aktuelle, adaptive Ansätze zur Steuerung von Produktionsabläufen adressieren bereits die situationsbezogene Ausführung von Steuerungsentscheidungen, häufig unter Einsatz intelligenter Produkte (vgl. Abschnitt 4.2.3). Jedoch basieren viele dieser Forschungsarbeiten auf Multiagentensystemen oder Derivaten mathematischer Modelle (z. B. genetische Algorithmen, Fuzzy-Logik), die in der industriellen Praxis bisher keine weite Verbreitung und Akzeptanz gefunden haben (SEIBOLD 2006, WEYNS et al. 2009). Weiterhin wurde festgestellt, dass die Modularisierungsansätze zur Komplexitätsbeherrschung in der Produktion nur selten aus Sicht der Produktionssteuerung gestaltet sind und meist ausschließlich eine produktorientierte Modulbildung vorgenommen wird, um die Materialflusskomplexität zu reduzieren (vgl. Abschnitt 4.2.4).

4.3 Organisationsstrukturen der Produktionssteuerung

4.3.1 Allgemeines

In dem vorherigen Abschnitt 4.2 wurde bei der Darstellung verschiedener Verfahren und Ansätze zur Steuerung von Produktionsabläufen deutlich, dass Informationen und Kommunikation eine wesentliche Grundlage für eine erfolgreiche Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung sind. Hierbei muss im Sinne einer zielgerichteten Informationslogistik sichergestellt werden, dass die notwendigen Daten in der richtigen Menge und Qualität rechtzeitig dem jeweiligen Steuerungssystem zur Verfügung stehen (JÜNEMANN & BEYER 1998). Die unzureichende Erfüllung dieser informationslogistischen Anforderungen ist einer der wesentlichen Gründe für das Verfehlen der angestrebten logistischen Zielgrößen eines produzierenden Unternehmens (SCHUH & WESTKÄMPER 2006, WIENDAHL 2008). Dies stellt gleichzeitig die Motivation für die Entwicklung unterschiedlicher Strukturen zur Organisation und Kommunikation der für die Produktionssteuerung relevanten Software-Systeme und Objekte dar.

4.3.2 Organisationsstrukturen von Produktionssteuerungssystemen

Die einem System zur Produktionssteuerung zugrunde liegende Struktur wird allgemein als Organisationsstruktur bezeichnet. Durch diese wird die Verteilung

4.3 Organisationsstrukturen der Produktionssteuerung

der Steuerungs- und Entscheidungskompetenz auf einzelne Steuerungselemente bzw. -einheiten festgelegt. Dabei wird definiert, welchen Einfluss die Software-Systeme, Objekte und Informationen in einem Produktionssystem auf die unterschiedlichen Steuerungsentscheidungen im Rahmen der Produktionssteuerung haben. Zusammen mit der Kommunikation, d. h. dem Informationsaustausch zwischen diesen Steuerungseinheiten, hat die Organisationsstruktur einen erheblichen Einfluss auf die Effektivität und Effizienz der Verfahren und Ansätze zur Produktionssteuerung (JÜNEMANN & BEYER 1998, FRESE 2005, KRÄKEL 2007, SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007). In diesem Zusammenhang kann eine Differenzierung der Organisationsstrukturen nach der Verteilung von Steuerungskompetenzen bzw. -aufgaben auf die einzelnen Instanzen erfolgen, wonach sich zentrale (hierarchische), dezentrale (heterarchische) und hybride Grundformen unterscheiden lassen (vgl. Abbildung 12) (ZÄPFEL 1998, BONGAERTS et al. 2000, OSTGATHE 2012, REINHART et al. 2013a).

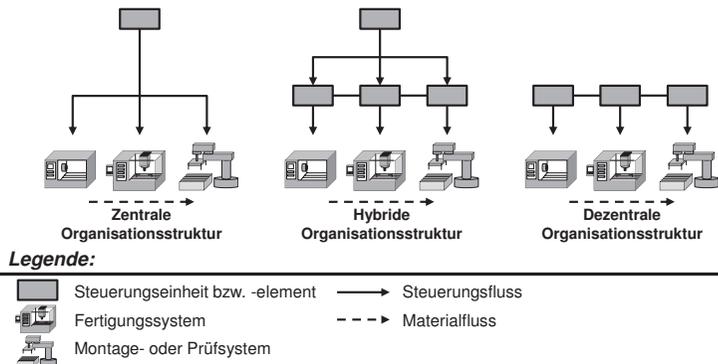


Abbildung 12: Grundformen von Organisationsstrukturen (BONGAERTS et al. 2000, TRENTESAUX 2009, OSTGATHE 2012)

Die zentrale Organisationsstruktur kann als traditionelle Organisationsstruktur verstanden werden, die beispielsweise die Grundlage zur computerintegrierten Fertigung (CIM - Computer Integrated Manufacturing) bildet. Dabei führt eine globale Einheit eine bereichsübergreifende Planung und Steuerung der Produktionsaufträge und Ressourcen durch. Aufgrund dieser zentralen, hierarchischen Koordination kann die globale Steuerungsaufgabe in lokale Teilaufgaben untergliedert werden, die entsprechend durch lokale, prozessnahe Steuerungselemente abgearbeitet werden. Hierdurch kann ein globales Optimum im Sinne der logistischen Zielerreichung realisiert werden. Die lokalen Elemente besitzen dabei ausschließlich ausführende Funktionen und stehen zu der globalen Steuerungseinheit in einer strikten Master-Slave-Beziehung. Aus diesem Grund werden im Falle von Planabweichungen (z. B. Störungen in der Produktion) zur notwendigen Entscheidungsfindung (z. B. Umplanungen) entsprechende Ist-Daten aus der

Produktion an die zentrale Steuerungseinheit kommuniziert. Aufgrund großer Datenmengen und zeitintensiver Rechenoperationen kann dieser zentrale Entscheidungsprozess häufig nicht kurzfristig erfolgen, wodurch schnelle Reaktionen und Anpassungen des Produktionssystems nur schwer realisierbar sind. Zentrale Organisationsstrukturen eignen sich deshalb weniger für die Anwendung in einem dynamischen Produktionsumfeld (z. B. Einzel- und Kleinserienfertigung), sondern mehr bei stabilen, deterministischen Umgebungsbedingungen, welche vorwiegend in der Großserienfertigung zu finden sind. (BONGAERTS et al. 2000, TRENTSEAX 2009, OSTGATHE 2012, REINHART et al. 2013a)

Um die Nachteile zentraler Organisationsstrukturen zu überwinden, wurden Steuerungssysteme, wie beispielsweise Multiagentensysteme (vgl. Abschnitt 4.2.3), entwickelt, die auf einer dezentralen Organisationsstruktur basieren. In diesen heterarchischen Strukturen werden die Steuerungskompetenzen und -aufwände auf mehrere lokale und kooperierende Steuerungseinheiten verteilt, um schnell auf Planabweichungen reagieren zu können. Die zentrale Steuerungsaufgabe wird in dieser Organisation ebenfalls in Teilaufgaben untergliedert, jedoch existiert kein übergeordnetes, koordinierendes Steuerungselement. Die dezentralen Steuerungseinheiten übernehmen somit Planungs-, Steuerungs- sowie Ausführungsaufgaben, die in gegenseitiger Abstimmung und unter Ausbildung selbststeuernder, dezentraler Regelkreise bearbeitet werden. Aus diesem Grund gelten dezentrale Organisationsstrukturen einerseits als hoch flexibel und robust gegenüber Störungen in der Produktion, wodurch sie sich insbesondere für die Einzel- und Kleinserienfertigung eignen. Andererseits kann ein dezentral organisiertes Steuerungssystem die Erreichung eines globalen Optimums im Produktionssystem nicht garantieren, wodurch dessen Verhalten als unvorhersehbar und stochastisch bezeichnet werden kann. (LIN & SOLBERG 1994, BONGAERTS et al. 2000, MONOSTORI et al. 2006, BÖSE & WINDT 2007, TRENTSEAX 2009, OSTGATHE 2012, REINHART et al. 2013a)

Hybride Organisationsstrukturen, die beispielsweise bei Holonic Manufacturing Systems (HMS) zum Tragen kommen, sollen die Vorteile der zuvor erläuterten Grundformen, die Koordination durch eine zentrale Steuerungseinheit sowie die Flexibilität und Robustheit dezentraler Steuerungseinheiten, miteinander vereinen. Dabei werden die Steuerungskompetenzen und -aufwände zur Beherrschung der Komplexität in geeigneter Form auf zentrale und dezentrale Steuerungselemente verteilt. Während von der zentralen Instanz mittelfristige Aufgaben durchgeführt werden, liegen die Aufgaben bei den dezentralen Steuerungseinheiten eher im kurzfristigen Zeitbereich. Durch eine gezielte Kompetenzerweiterung lokaler Steuerungseinheiten in Bezug auf planende, steuernde und kontrollierende Funktionen, kann schnell und flexibel auf Planabweichungen reagiert werden, wodurch das Steuerungssystem entscheidend an Robustheit gegenüber Störungen und unvorhergesehenen Ereignissen gewinnt. Die zentralen Elemente sichern gleichzeitig ein koordiniertes, vorhersehbares Verhalten des Produktionssystems

und eine Erreichung des globalen Optimums hinsichtlich der logistischen Zielgrößen. (VALCKENAERS & VAN BRUSSEL 2005, WINDT 2008, OSTGATHE 2012, REINHART et al. 2013a)

4.3.3 Zwischenfazit

In dem vorliegenden Abschnitt wurden die drei grundlegenden Organisationsstrukturen von Systemen zur Steuerung von Produktionsabläufen vorgestellt. Dabei wurden insbesondere deren Vor- und Nachteile für den Einsatz in der Planung und Steuerung einer auftragsbezogenen Produktion, welche heute maßgeblich durch die Fertigung von Einzel- und Kleinserien sowie eine Organisation nach dem Verrichtungsprinzip geprägt ist (vgl. Abschnitt 2.2), diskutiert. Die Notwendigkeit einer zentralen Steuerungseinheit, die koordinierend und im Hinblick auf eine globale logistische Zielerreichung wirkt, wurde erkannt. Durch eine gezielte Verlagerung von planenden, steuernden und kontrollierenden Funktionen auf prozessnahe, dezentrale Steuerungselemente, kann die erforderliche hohe Flexibilität der Produktionssteuerung und eine hohe Robustheit des Produktionssystems erreicht werden. Aus diesem Grund stellt eine hybride Organisationsstruktur eine vielversprechende Grundform zur Strukturierung der Steuerungssysteme und -objekte für die im Rahmen dieser Arbeit adressierte situationsbasierte Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage dar.

4.4 Strukturierung steuerungsrelevanter Informationen

4.4.1 Allgemeines

Wie in Kapitel 3 erläutert, ist ein durchgängiges Datenmodell für eine zeitgemäße Produktionssteuerung notwendig, welches die steuerungsrelevanten Informationen mit ihren jeweiligen Beziehungen konsistent und strukturiert spezifiziert. Ein solches Modell ist eine wesentliche Voraussetzung für eine effiziente Informationsverarbeitung und sollte die zu beschreibenden Informationen möglichst realitätsnah und mit allen für die jeweilige Aufgabenstellung relevanten Attributen abbilden (WIENDAHL 1996a, FELDMANN 1997, WIEDENMANN 2001). Darüber hinaus ist für einen vorliegenden Anwendungsfall im Hinblick auf die Steuerung von Produktionsabläufen festzulegen, wie produktions- und somit steuerungsrelevante Informationen gehalten und den jeweiligen Planungs- und Steuerungssystemen bereitgestellt werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein System zur situationsbasierten Produktionssteuerung zu entwickeln, das auf der aktuellen Auftragsituation, im Sinne des aktuellen Produktzustands und Auftragsstatus, basiert. Vor diesem

Hintergrund werden im Folgenden in einem ersten Schritt relevante Ansätze diskutiert, die sich mit der Modellierung auftrags- und produktbezogener Informationen beschäftigen. Darauf aufbauend erfolgt die Darstellung von Konzepten zur Speicherung sowie Richtlinien zur Strukturierung steuerungsrelevanter Produktionsinformationen unter Einsatz moderner IuK-Technologien.

4.4.2 Modellierung auftrags- und produktbezogener Informationen

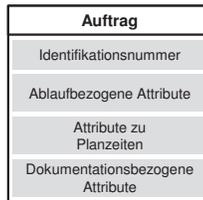
Die DIN 6789-2 beschäftigt sich mit Informationen, die für ein bestimmtes Produkt bzw. Erzeugnis gelten und bezeichnet diese als *Produktinformationen*. Diese Norm unterscheidet dabei zwischen technischen und kommerziellen Informationen, wobei im Rahmen dieser Arbeit Informationen zur Steuerung von Abläufen in der Produktion adressiert werden, sodass die kommerziellen Produktinformationen nicht weiter betrachtet werden. Unter den technischen Produktinformationen werden alle Daten verstanden, die ein Produkt aus technologischer (z. B. Material), geometrischer (z. B. Abmessungen) und organisatorischer (z. B. Liefertermin) Sicht, welche z. B. in Zeichnungen oder Stücklisten hinterlegt sind, spezifizieren. (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 1990)

Werden technische Produktinformationen integriert in einem rechnergestützten System abgelegt, so werden diese als *Produktmodell* bezeichnet (EIGNER & STELZER 2009). Die Richtlinie ISO 10303 nutzt diesen Begriff ebenfalls und definiert im Rahmen von STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) ein integriertes Produktmodell als Standard für die Speicherung, den Austausch und die Weiterverarbeitung von Produktdaten. Ähnlich der vorherigen Ausführungen werden auch in diesem Produktmodell organisatorische und geometrische Produktinformationen zusammengefasst (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 1996). Darüber hinaus stellt STEP Basismodelle bereit, mit welchen Produktinformationen unabhängig von einem Anwendungsfall modelliert bzw. spezifiziert werden können (ANDERL & TRIPPNER 2000, DYLA 2002, OSTGATHE 2012).

OSTGATHE (2012) greift die Definition von Produktinformationen nach DIN 6789-2 auf und entwickelt darauf aufbauend eine *Referenzinformationsstruktur* zur Beschreibung von Produkten und Zuständen von Werkstücken. In dieser Baumstruktur werden sämtliche Informationen zusammengefasst, die das Produkt mit seinen geometrischen und technologiebezogenen Eigenschaften beschreiben. Zusätzlich werden in diesem Datenmodell auftragsbezogene organisatorische sowie ggf. strukturbezogene Informationen ergänzt. Diese auftrags- und produktbezogenen Daten werden am intelligenten Produkt mitgeführt und während des Wertschöpfungsprozesses kontinuierlich aktualisiert. Der aktuelle Produktionsfortschritt kann so als Produktzustand am Werkstück gespeichert und in der sogenannten produktbasierten Steuerung von Abläufen in der hoch automatisierten Fertigung und Montage gezielt berücksichtigt werden.

4.4 Strukturierung steuerungsrelevanter Informationen

PHILIPP (2014) beschreibt RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen und entwickelt hierfür ein Produktdatenmodell auf Basis der Modellierungssprache UML (Unified Modeling Language). Produkt- bzw. auftragsbezogene Informationen werden dabei in der Klasse *Auftrag* gespeichert. Diese Klasse umfasst neben der Identifikationsnummer verschiedene prozess- bzw. ablaufbezogene Attribute (Temperaturanforderungen, Plan-Bearbeitungszeiten etc.). Darüber hinaus sieht diese Klasse dokumentationsbezogene Attribute vor, welche beispielsweise Ist-Bearbeitungszeitpunkte festhalten (vgl. Abbildung 13).



Legende:



Abbildung 13: Attribute eines Auftrags in UML (PHILIPP 2014)

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „RAN“ (RFID-based Automotive Network) konnte eine Infrastruktur geschaffen werden, mit der die echtzeitnahe Generierung und Bereitstellung von auftragsbezogenen Informationen entlang der Wertschöpfungskette möglich sind. Diese auftragsbezogenen Informationen eines mit einem RFID-Transponder ausgestatteten Produktes werden dabei mittels Schreib-/Lesegeräten, sogenannten RFID-Identifikationspunkten, entlang des Materialflusses generiert. Dabei wird das Produkt über die eindeutige Objekt-ID auf dem Transponder identifiziert und mit ablaufbezogenen Informationen (z. B. aktuell abgeschlossener Arbeitsschritt) verknüpft. Dieses RFID-Leseereignis wird nach den Modellierungsvorgaben des Electronic Product Code Information Service (EPCIS) als sogenanntes *EPCIS-Event* strukturiert. Ein solches auftragspezifisches EPCIS-Event fasst bei einem Lesevorgang Informationen über das identifizierte Objekt (Was?) sowie den Zeitpunkt (Wann?), den Ort (Wo?) und den Grund (Warum?) einer bestimmten Produktidentifikation zusammen. Demzufolge handelt es sich bei diesen Ereignisinformationen, gemäß der vorgestellten DIN 6789-2, ausschließlich um organisatorische Produktinformationen. Eine Speicherung von geometrischen oder technologischen Informationen ist nicht vorgesehen. Das generierte EPCIS-Event wird in einer lokalen Datenbank abgelegt, welche Bestandteil eines sogenannten *Infobrokers* ist, der über zusätzliche zentrale Dienste (z. B. Routing, Zugriffsrechteverwaltung) verfügt und so einen

echtzeitnahen, überbetrieblichen Austausch auftragsbezogener Informationen entlang der Wertschöpfungskette ermöglicht. Die ausgetauschten Events schaffen eine hohe Informationstransparenz und können von den Planungs- und Steuerungssystemen der beteiligten Unternehmen berücksichtigt und gezielt in die situationsbasierte Entscheidungsfindung eingebunden werden. (GS1-STANDARD 2007, TAMM & TRIBOWSKI 2010, REINHART et al. 2011a, SCHMID et al. 2014)

4.4.3 Ansätze zur zentralen und dezentralen Datenhaltung

Wie in den Abschnitten 2.4.2 und 4.2.3 ausführlich beschrieben, gewinnen moderne IuK-Technologien zunehmend für eine zielgerichtete Produktionssteuerung an Bedeutung. Durch die Forderung nach hoher Informationstransparenz mit einem parallelen Material- und Informationsfluss, erfolgt zunehmend eine Diskussion der dezentralen Datenhaltung von Produktinformationen auf dem RFID-Transponder eines Werkstücks. Dieser RFID-basierte *Data-on-Tag-Ansatz* konkurriert mit der zentralen Bereitstellung von steuerungsrelevanten auftrags- und produktbezogenen Informationen durch ein Netzwerk, dem *Data-on-Network-Ansatz* (REINHART et al. 2011a).

Der Data-on-Network-Ansatz sieht eine zentrale Speicherung der Produktinformationen vor. Hierfür werden in der Regel Datenbanken eingesetzt, die in betriebliche Planungs- und Steuerungssysteme (z. B. ERP-Systeme, MES) eingebettet sind, wodurch sich Fehler durch den Zugriff auf nicht aktuelle, parallel abgespeicherte Daten vermeiden lassen. Bei dem Einsatz der RFID-Technologie wird über die eindeutige Identifikationsnummer des Objektes auf die zugehörigen Daten im Netzwerk referenziert, wobei diese Informationen unabhängig von der Präsenz des Objektes für Planungs- und Steuerungsaufgaben zur Verfügung stehen. Der Ansatz einer zentralen Datenhaltung macht aus diesem Grund insbesondere dann Sinn, wenn unabhängig von der physischen Verfügbarkeit des Objektes, ein zeit- und ortsunabhängiger Zugriff auf die produktbezogenen Daten erforderlich ist. Ein großer Vorteil des Data-on-Network-Ansatzes ist die Verfügbarkeit von Standards zur Strukturierung der Identifikationsnummer des Objektes, wie z. B. der EPC (Electronic Product Code, vgl. Abschnitt 4.4.4), die insbesondere eine unternehmensübergreifende Nutzung der Identifikationsnummer vereinfachen. Darüber hinaus können bei diesem Ansatz kostengünstige Transponder mit einem geringen Speicherplatz eingesetzt werden, da lediglich die Objekt-ID abgelegt werden muss. Mit Hilfe der Implementierung mehrerer RFID-Identifikationspunkte entlang des Materialflusses kann die Generierung und Bereitstellung auftrags- und produktbezogener Informationen nach den Vorgaben des EPCIS, wie im Abschnitt 4.4.2 dargestellt, erfolgen und in Planungs- und Steuerungsentscheidungen gezielt berücksichtigt werden. (DIEKMANN et al. 2007, WERNER et al. 2007, FINKENZELLER 2008, MELSKI & SCHUMANN 2008, REINHART et al. 2011a, OSTGATHE 2012)

Der wesentliche Unterschied zwischen dem Data-on-Network- und dem Data-on-Tag-Ansatz ist der, dass bei Letzterem die Daten nur dezentral am Objekt abgelegt werden. Die Trennung zwischen dem Objekt und den zugehörigen Daten wird damit aufgehoben. Im Falle des Data-on-Tag-Ansatzes können so System-schnittstellen zwischen verschiedenen Planungs- und Steuerungssystemen im Unternehmen entlastet werden, indem relevante Informationen echtzeitnah durch das intelligente Produkt selbst bereitgestellt werden. Die Programmierung einfacher, auf dem Data-on-Tag-Ansatz basierender Applikationen ermöglicht zudem, gerade in kleinen und mittleren produzierenden Betrieben, eine Alternative zu kostenintensiven Planungs- und Steuerungssystemen (z. B. MES). Das Gesamtsystem wird, gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.3, durch die Dezentralisierung robuster und Daten sind schneller vor Ort verfügbar, da, in Abhängigkeit der Leistung eines vorhandenen Netzwerkes, schnellere Antwortzeiten im Vergleich zu einem zentralen Ansatz realisiert werden können. Die am Produkt abgelegten produkt- bzw. auftragsspezifischen Daten können ferner als Befähiger zur An- bzw. Selbststeuerung und Absicherung von Produktionsprozessen eingesetzt werden. (DIEKMANN et al. 2007, WERNER et al. 2007, FINKENZELLER 2008, MELSKI & SCHUMANN 2008, REINHART et al. 2011a, OSTGATHE 2012)

4.4.4 Richtlinien zur dezentralen Datenstrukturierung

Aufgrund der beschriebenen Vorteile der dezentralen Datenhaltung sowie dem zunehmenden Trend zur Integration intelligenter Produkte als zusätzliche Steuerungselemente in die Abläufe der Produktion (vgl. Abschnitt 4.2.3), werden im Folgenden einige Forschungsansätze und Empfehlungen zur dezentralen Speicherung von objektbezogenen Daten auf dem Transponder vorgestellt. Für den Data-on-Tag-Ansatz existieren noch keine anerkannten und in der Industrie verbreiteten Standards. Insbesondere gilt das für die Strukturierung der im User Memory des Transponders zu speichernden Nutzdaten. (TRIBOWSKI et al. 2009, PAIS & SYMONDS 2011)

Die sich ergänzenden Richtlinien ISO/IEC 15961 und ISO/IEC 15962 beschäftigen sich mit Datenprotokollen zum Austausch von Informationen in RFID-Systemen. Mit sogenannten *accessMethods* beschreiben die Richtlinien Strukturempfehlungen, wie die zu speichernden Datensätze auf dem Transponder gespeichert und ausgelesen werden können. Die *accessMethod noDirectory* sieht die triviale Strukturierung des Transponderspeichers, im Sinne einer stetigen Aneinanderreihung von Datensätzen, vor (vgl. Abbildung 14, links). Die *accessMethod directory*, welche insbesondere bei einer großen Anzahl an zu speichernden Daten empfohlen wird, erweitert die *noDirectory*-Datenstruktur um ein Inhaltsverzeichnis (vgl. Abbildung 14, rechts). (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 2004a, INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 2004b, REINHART et al. 2013b)

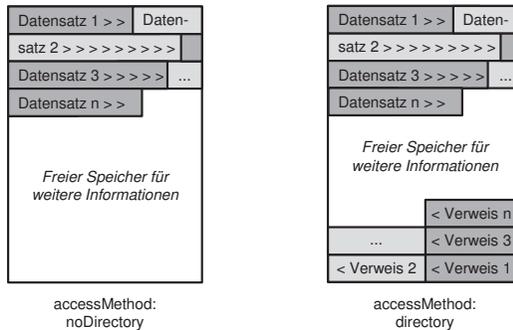


Abbildung 14: Vergleich der *accessMethods noDirectory* und *directory* (ISO/IEC 15962 2004b)

Der Electronic Product Code (EPC) Tag Data Standard der Organisation GS1 spezifiziert im Wesentlichen die Struktur der eindeutigen Identifikationsnummer, des sogenannten EPC, auf dem Transponder eines Objektes. Hinsichtlich der Datenstrukturierung des User Memorys nimmt dieser Standard Bezug auf die dargestellten ISO/IEC Richtlinien und empfiehlt die Strukturierung der zu speichernden Nutzdaten nach der *accessMethod packed objects*. Dabei werden Daten oder Verzeichnisse in Datenpaketen zusammenfasst. Diese Datenpakete werden sequentiell auf dem Transponder gespeichert und dabei optional von je einer Füll- oder Verweisinformation auf ein dazugehöriges Verzeichnis voneinander getrennt, wodurch eine schnelle Auswertung der Informationen und damit ein schnelles Schreiben und Lesen der gewünschten Daten ermöglicht wird. Falls diese *accessMethod* für den Anwendungsfall ungeeignet ist, wird die triviale Strukturierung nach der *accessMethod noDirectory* empfohlen. (GS1-STANDARD 2011, REINHART et al. 2013b)

Der Global RFID Item Level Standard ist eine Empfehlung des Joint Automotive Industry Forum (JAIF) zur Kennzeichnung und Verfolgung von Objekten in automobilen Wertschöpfungsketten. Diese beschäftigt sich, wie die Empfehlungen des VDA (Verband der Automobilindustrie) 5501 "RFID im Behältermanagement der Supply Chain" sowie 5510 „RFID zur Verfolgung von Teilen und Baugruppen in der Automobilindustrie“, u. a. mit der Strukturierung von Nutzdaten auf einem Transponder. Die von JAIF und VDA empfohlene Datenstruktur *accessMethod noDirectory* lehnt sich dabei an die oben beschriebenen ISO/IEC-Richtlinien bzw. den GS1-STANDARD (2011) an. Darüber hinaus wird die Ablage der Daten in bestimmten Datenformaten gefordert. Zusammenfassend empfehlen JAIF und VDA somit die sequentielle Speicherung von Datensätzen, die einem vorgeschriebenen, fixen Datenformat entsprechen. (JOINT AUTOMOTIVE INDUSTRY FORUM 2011, VDA-EMPFEHLUNG 5501 2011, VDA-EMPFEHLUNG 5510 2011, REINHART et al. 2013b)

4.4 Strukturierung steuerungsrelevanter Informationen

TRIBOWSKI et al. (2009) schlagen vor, die auf einem Transponder zu speichernden Nutzdaten nach der ISO-Richtlinie 13584-42, die sich mit einer konzeptuellen Methode zur Strukturierung und Beschreibung von technischen Produktinformationen beschäftigt, zu speichern. Dieser Ansatz konnte erfolgreich bei einem produzierenden Unternehmen unter Einsatz der Extensible Markup Language (XML) umgesetzt werden. Das XML-Format ist sehr flexibel und ermöglicht beliebige Datenstrukturen (ERLENKÖTTER 2003). Jedoch weist es nach PAIS & SEYMONDS (2011) im Vergleich zum Datenformat CSV (Comma Separated Value) einen wesentlich größeren Speicherbedarf auf dem Transponder auf. Die Autoren belegen durch experimentelle Studien mit dem CSV-Format ebenfalls wesentlich kürzere Lesevorgänge als beim XML-Format, stellen jedoch verschiedene Problematiken beim Schreiben dieses Formats fest.

Im Rahmen des Forschungsprojektes Semantic Product Memory (SemProM) wurde das sogenannte SemProM-Datenformat entwickelt und erfolgreich erprobt. Da es sich bei diesem Format um ein Binärformat handelt, können beliebige Informationen, die binär vorliegen, ohne vorherige Konvertierung einfach und effizient abgelegt werden. Diese binäre Datenstruktur eignet sich nicht nur für RFID-Transponder, sondern für alle vier Klassen intelligenter Produkte (vgl. Abbildung 10). Sie ermöglicht Informationen sehr platzsparend auf Transpondern zu speichern, wobei der Speicherplatz dabei in Speicherblöcke untergliedert wird, die sämtliche Informationen enthalten und deren mögliche Anzahl und Größe direkt von der Kapazität des Transponders bzw. des intelligenten Produktes abhängig ist. Metainformationen, die ebenfalls auf dem Transponder abgelegt werden, beschreiben die Inhalte der gespeicherten Datensätze und wirken als Speicherverwaltung des Transponders. Das SemProM-Datenformat unterscheidet zwischen drei unterschiedlichen Arten von Speicherblöcken (vgl. Abbildung 15): *SemProM-Header*, *Block-Header* und *Daten-Block*. (HORN et al. 2013, REINHART et al. 2013b, SEMPROM 2013, WAHLSTER 2013)

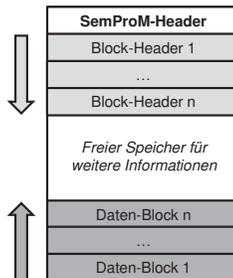


Abbildung 15: SemProM-Datenformat (HORN et al. 2013)

Der kompakte SemProM-Header besteht aus der Identifikationsnummer (*Identifier*) des Objektes sowie einigen Attributen, die ein effizientes Informationsmanagement ermöglichen. Die Block-Header werden von vorne nach hinten auf

dem Transponder, im Anschluss an den SemProM-Header, gespeichert und sind einem bestimmten Daten-Block, welche wiederum von hinten nach vorne auf dem Transponder abgelegt werden, zugeordnet. Sie enthalten sämtliche Informationen, die für einen direkten und wahlfreien Zugriff auf einen bestimmten Daten-Block notwendig sind. Damit wird es möglich, in einem ersten, schnellen Lesevorgang, ausschließlich die Header auszulesen und zu interpretieren. Im Anschluss kann der gewünschte Daten-Block in einem zweiten Lesevorgang gezielt ausgelesen werden. Durch dieses Verfahren wird vermieden, dass beim Auslesen oder Schreiben des Transponders der gesamte Speicherbereich über die Luftschnittstelle transferiert werden muss. Besonders bei Transpondern mit einer hohen Speicherkapazität des User Memorys kann so eine erhebliche Verringerung der Lese- und Schreibzeiten erreicht werden. (HORN et al. 2013, REINHART et al. 2013b, SEMPROM 2013, WAHLSTER 2013)

4.4.5 Zwischenfazit

In dem vorliegenden Abschnitt wurden aktuelle Ansätze und Empfehlungen zur Modellierung und Speicherung von steuerungsrelevanten Informationen vorgestellt. Hinsichtlich der Modellierung von auftrags- und produktbezogenen Informationen stellen der Einsatz der Modellierungssprache UML und die Gliederung technischer Produktionsinformationen in organisatorische und prozessuale Informationen einen sinnvollen und bewährten Ansatz dar. Für die Schaffung einer hohen Informationstransparenz in der Produktion und einer situationsbasierten Ausführung von Planungs- und Steuerungsentscheidungen bildet das Infobroker-Konzept in der Kombination mit dem Einsatz von auftrags- und produktspezifischen Ereignisinformationen eine gute Grundlage. Aufgrund der in dem Ereignismodell des EPCIS fehlenden prozessualen, produktspezifischen Informationen (z. B. Qualitätsdaten), kann eine Einbindung in Entscheidungen der Produktionssteuerung nur bedingt erfolgen.

Die Diskussion der Ansätze Data-on-Network und Data-on-Tag hat gezeigt, dass sowohl die zentrale als auch die dezentrale Datenhaltung relevante Potenziale für ein effizientes Informationsmanagement und damit für die logistische Zielerreichung mittels der Produktionssteuerung aufweisen. Insbesondere der in der industriellen Produktion noch nicht weit verbreitete Data-on-Tag-Ansatz wird als Befähiger für die An- und Selbststeuerung sowie für die Absicherung von Produktionsprozessen betrachtet. Aufgrund des geringen industriellen Einsatzes des User Memorys eines Transponder zur Speicherung von Nutzdaten und damit der Bereitstellung von auftrags- und produktbezogenen Informationen über das intelligente Produkt, liegen keine verbreiteten Standards zur Strukturierung der dezentral gespeicherten Daten vor.

Die vorgestellten Empfehlungen für eine sequentielle Ablage von Nutzdaten auf einem Transponder eignen sich lediglich für kleinere Datenmengen (bis ca. 300

Byte) (REINHART et al. 2013b). Als sinnvolles, wenn auch nicht platzsparendes Speicherformat, wird das XML-Format vorgeschlagen. Die Tatsache, dass auf die abgelegten Datensätze bei diesen Empfehlungen nicht wahlfrei zugegriffen werden kann, lässt den Einsatz von Transpondern mit größerer Kapazität ineffizient erscheinen. Das SemProM-Datenformat überwindet diesen Nachteil und bietet eine sinnvolle und vielversprechende Möglichkeit, große Datenmengen auf einem intelligenten Produkt strukturiert ablegen und insbesondere wahlfrei und dadurch schnell auslesen zu können.

4.5 Handlungsbedarf

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels wurden die für diese Arbeit relevanten wissenschaftlichen Ansätze vorgestellt und analysiert. Aufbauend auf den in Kapitel 3 definierten Anforderungen wurde der Fokus dabei auf bestehende Ansätze zur Steuerung von Produktionsabläufen, Strukturen zur Organisation von Systemen zur Produktionssteuerung und auf die Strukturierung steuerungsrelevanter Informationen gelegt. Es konnte gezeigt werden, dass diese Forschungsansätze eine adäquate Grundlage für die zeitgemäße Produktionssteuerung darstellen, jedoch deren Anforderungen nicht ausreichend erfüllen.

Im vorangehenden Teil der Arbeit wurde verdeutlicht, dass bestehende Modularisierungsansätze nur selten aus Sicht der Produktionssteuerung gestaltet sind und meist zur Erreichung einer geringen Materialflusskomplexität eine *produktorientierte* Modulbildung vorgenommen wird. Dies reicht jedoch nicht aus, um die heutige Steuerungskomplexität zu beherrschen und den Anforderungen an eine zeitgemäße Produktionssteuerung gerecht zu werden. Deshalb muss ein *steuerungsorientiertes* Vorgehen zur Modularisierung neben der Produktstruktur insbesondere die steuerungsrelevanten Produktionsmerkmale (vgl. Abschnitt 2.2) und die eingesetzten Produktionsressourcen mit ihren spezifischen Charakteristika berücksichtigen. Damit schafft die Produktionsmodularisierung die betriebsorganisatorische Basis zur Implementierung eines effizienten Informationsmanagements zur Erfassung, Speicherung und Bereitstellung steuerungsrelevanter Produktionsinformationen. Darüber hinaus muss das Modularisierungsvorgehen die Ausführung von situationsbasierten Steuerungsverfahren unterstützen und die Möglichkeit zur Synchronisation von Produktionsabläufen schaffen. Gemäß dem hybriden Konzept zur Verteilung von Steuerungskompetenzen auf zentrale und dezentrale Produktionseinheiten, erhalten die Module organisatorische und zeitliche Freiheitsgrade, die eine steuerungsorientierte Selbstoptimierung innerhalb des Moduls zulassen. Damit wird neben einer verbesserten logistischen Zielerreichung zudem eine hohe Akzeptanz des Steuerungssystems erzielt.

Im Rahmen der Vorstellung und Diskussion möglicher Organisationsstrukturen in der Produktionssteuerung wurde gezeigt, dass eine hybride Grundform zur Struk-

turierung der Steuerungselemente, gerade in nach dem Verrichtungsprinzip arbeitenden Produktionsumgebungen, vielversprechend und vorteilhaft sein kann. Hierbei wird durch eine zentrale Steuerungseinheit abgesichert, dass globale logistische Zielsetzungen (z. B. Einhaltung der Termintreue) erreicht werden. Durch eine gezielte Verlagerung von Steuerungsfunktionen auf prozessnahe, dezentrale Steuerungselemente können wiederum zusätzliche Freiheitsgrade in einem Modul geschaffen werden, wodurch die Robustheit und die Flexibilität des Produktionssystems maßgeblich gesteigert werden. Bestätigt durch die Studie des VDMA e. V., des FIR e. V. und des WZL der RWTH Aachen, wonach 100 % der befragten Produktionsleiter dezentrale und auf Echtzeit-Informationen basierende Steuerungsansätze als zukunftsweisend erachten (SCHUH & STICH 2011), stellt der Einsatz der RFID-Technologie zur echtzeitnahen Generierung einer hohen Informationstransparenz eine vielversprechende Lösung dar. Ein auf der RFID-Technologie basierendes, hybrides Informationsmanagement ist in der Lage, einen durchgängigen Informationsfluss zwischen Planungs-, Steuerungs- und Betriebsdatenerfassungssystemen zu schaffen. Hierfür ist es erforderlich, mit Hilfe einer Referenzarchitektur eine allgemeingültige Implementierungsvorlage zu schaffen, die alle relevanten Steuerungselemente sowie deren Aufgaben und Schnittstellen eindeutig spezifiziert.

Bestehende konventionelle Verfahren zur Erfüllung der Aufgaben der Produktionssteuerung können nicht ereignisorientiert und unter Berücksichtigung der aktuellen Produktionssituation ausgeführt werden, da in produzierenden Unternehmen selten leistungsfähige Systeme zur Betriebsdatenerfassung zur Verfügung stehen oder nicht in die Systeme zur Produktionssteuerung integriert werden. Die minutiösen feinterminierenden Maschinenbelegungspläne, als wesentliches Ergebnis der Produktionsplanung, sind von der Steuerung häufig nicht einzuhalten. Aktuelle, adaptive Ansätze zur Produktionssteuerung, die unter Einsatz intelligenter Produkte versuchen, Steuerungsentscheidungen situationsbezogen auszuführen, basieren meist auf Multiagentensystemen oder Modellen, die in der produzierenden Industrie bisher keine weite Verbreitung und Akzeptanz gefunden haben. Aus diesem Grund ist es erforderlich, konventionelle Steuerungsverfahren hinsichtlich einer situationsbasierten Ausführbarkeit zu analysieren, eventuell zu adaptieren und gezielt um situationsbasierte Steuerungsverfahren zu ergänzen. Diese Steuerungsverfahren sollen in der modularisierten Produktion eine Verbesserung der logistischen Zielerreichung ermöglichen, indem die Steuerungskomplexität beherrscht wird und synchrone Produktionsabläufe geschaffen werden.

5 Systemübersicht

5.1 Allgemeines

Kapitel 5 gibt eine Übersicht über das System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung für die auftragsbezogene Fertigung und Montage, dessen Elemente nachfolgend in den Kapiteln 6, 7 und 8 detailliert entwickelt werden. Aufbauend auf der in den Abschnitten 1.1 und 1.2 dargestellten gegenwärtigen Situation produzierender Unternehmen und der damit verbundenen Motivation der Arbeit, verfolgt das System das Ziel, Steuerungsentscheidungen gemäß den Anforderungen einer zeitgemäßen Produktionssteuerung (vgl. Kapitel 3) auf Basis der aktuellen Produktionssituation zu treffen und somit eine verbesserte logistische Zielerreichung zu ermöglichen. Unter Berücksichtigung des aktuellen Standes der Forschung und Technik und des daraus abgeleiteten Handlungsbedarfs setzt sich das Steuerungssystem aus den folgenden drei Systemelementen zusammen (vgl. Abbildung 16):

- Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung
- RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement
- Situationsbasierte Steuerungsverfahren

5.2 Systemelemente

Unter dem Systemelement *steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung* wird ein *strukturiertes Vorgehen* verstanden, mit welchem eine Produktionsumgebung aus Steuerungssicht in sogenannte Produktionsmodule untergliedert werden kann. Ein Produktionsmodul beschreibt dabei die logische Zusammenfassung von Arbeitssystemen. Dieses Systemelement stellt damit die *betriebsorganisatorische Basis* des Produktionssteuerungssystems dar. Die Produktionsmodularisierung verfolgt das Ziel, die Komplexität einer effektiven Produktionssteuerung zu reduzieren und gleichzeitig die Grundlage zur Implementierung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements und zur Ausführung situationsbasierter Steuerungsverfahren zu schaffen. Das Vorgehen baut sowohl auf produktbezogenen (vgl. Abschnitt 4.2.4) als auch auf ressourcen- und steuerungsbezogenen Modularisierungsprinzipien auf.

5 Systemübersicht

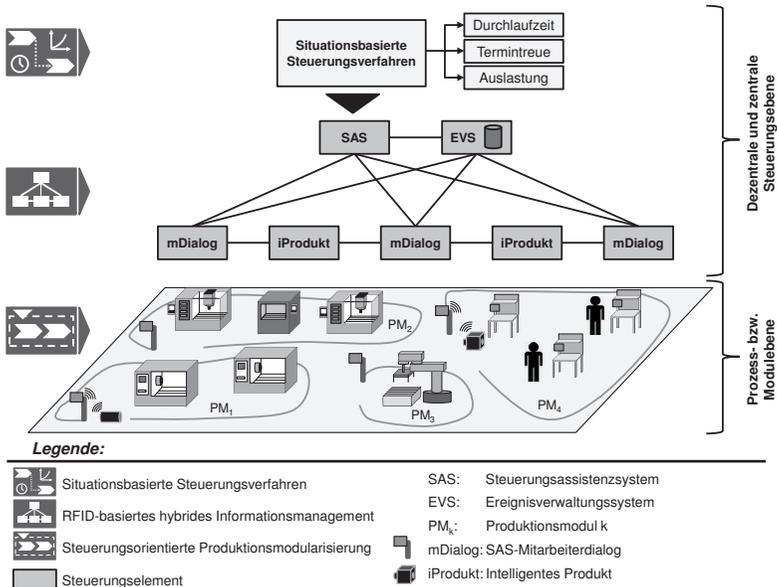


Abbildung 16: System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung

Das Systemelement *RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement* stellt die *informationstechnische Basis* des situationsbasierten Steuerungssystems dar. Im Rahmen dieses Informationsmanagements werden eine hybride *Referenzarchitektur* eingeführt, deren zentrale und dezentrale Steuerungselemente spezifiziert sowie die notwendigen Daten und Datenstrukturen entwickelt. Zu den zentralen Steuerungselementen zählen ein Steuerungsassistenzsystem (SAS), in welchem die zentralen situationsbasierten Steuerungsverfahren umgesetzt werden, sowie ein Ereignisverwaltungssystem (EVS), das die Bereitstellung und Verteilung von auftrags- und produktspezifischen Ereignisinformationen zum aktuellen Produktionsfortschritt in Echtzeit ermöglicht. Die dezentralen Steuerungselemente umfassen zum einen die mit einem RFID-Transponder ausgestatteten, intelligenten Produkte (vgl. Abschnitt 4.2.3). Diese Produkte lassen sich eindeutig identifizieren und sind in der Lage, auftrags- und produktspezifische Informationen zu speichern und diese zur Berücksichtigung in Steuerungsentscheidungen dezentral bereitzustellen. Zum anderen steht jedem Produktionsmodul ein SAS-Mitarbeiterdialog zur Verfügung, über den der aktuelle Auftragsvorrat an die Mitarbeiter kommuniziert wird und relevante Produktionsabläufe dezentral steuernd beeinflusst werden können.

Den Kern des Steuerungssystems bilden die *situationsbasierten Steuerungsverfahren*, die auf den beiden zuvor eingeführten Systemelementen aufbauen. Hierfür werden *Produktionssteuerungsverfahren* gestaltet, die die aktuelle Produktionssituation freigegebener Aufträge bei der Ausführung ihrer jeweiligen Steuerungsaufgabe berücksichtigen. In einem ersten Schritt erfolgt jeweils die Analyse und etwaige Adaption von konventionellen Verfahren (vgl. Abschnitt 4.2.2) hinsichtlich einer situationsbasierten Ausführbarkeit. Darauf aufbauend werden systemspezifische Steuerungsverfahren entwickelt, die ebenfalls auf der aktuellen Auftragsituation basieren. Hierzu zählen die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe, die situationsbasierte Reihenfolgebildung mit intermodularer Schlupfzeitverteilung sowie die intramodulare Rückstandsregelung.

Die *synchrone zweistufige Auftragsfreigabe* verfolgt das Ziel, die Produktion der Komponenten eines zu montierenden Produktes mit Hilfe von sogenannten Synchronisationspunkten zeitlich und produktspezifisch zu synchronisieren. Dabei erfolgt auf der ersten Freigabestufe die Auftragsfreigabe der sogenannten Hauptkomponenten und auf der zweiten Freigabestufe die synchrone Auftragsfreigabe der Nebenkomponten des zu montierenden Produktes.

Zur Erreichung einer möglichst hohen Termintreue wird die *situationsbasierte Schlupfzeitregelung* zur Priorisierung der Produktionsaufträge auf Modulebene eingesetzt und, um die Effektivität dieser Reihenfolgeregel zu steigern, mit der *intermodularen Schlupfzeitverteilung* verknüpft. Diese verteilt die Gesamtschlupfzeit eines Auftrags anforderungsgerecht (z. B. in Abhängigkeit der modulspezifischen Durchlaufzeit) auf alle noch zu durchlaufenden Produktionsmodule. Darüber hinaus erfolgt an einem Engpass-Arbeitssystem, unter Einhaltung vorgegebener Terminschränken, eine *rüstzeitoptimierende Sequenzierung* der Produktionsaufträge, um eine möglichst hohe Auslastung zu erzielen.

Die *intramodulare Rückstandsregelung* hat die Aufgabe, die zur Verfügung stehenden Kapazitäten kurzfristig an den schwankenden, aktuellen Kapazitätsbedarf anzupassen. Dies erfolgt auf Basis der betriebsparallelen Messung des aktuellen Rückstands unter Einsatz des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements.

6 Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung

6.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel 6 wird ein Vorgehen entwickelt, welches die strukturierete Modularisierung von Arbeitssystemen zu Produktionsmodulen aus Sicht der Produktionssteuerung ermöglicht. Diese Produktionsmodule stellen die betriebsorganisatorische Basis des vorliegenden Produktionssteuersystems dar:

Unter einem Produktionsmodul wird die logische, in Anlehnung an RHEAULT et al. (1995) nicht zwingend physische, Zusammenfassung von mehreren Arbeitssystemen einer Produktionsumgebung unter Berücksichtigung der Anforderungen einer zeitgemäßen Produktionssteuerung verstanden.

Angelehnt an die Organisationsbereiche eines produzierenden Unternehmens nach WIENDAHL (2010), gliedert sich das Produktionsmodul gemäß Abbildung 17 in die hierarchische Organisationsstruktur eines Betriebs ein.

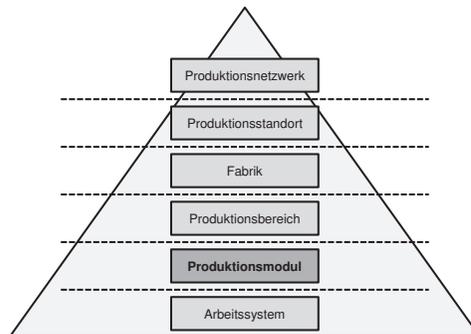


Abbildung 17: Einordnung des Produktionsmoduls in die hierarchische Betriebsstruktur (STÜRMAN 2012)

Das Modularisierungsvorgehen eignet sich sowohl für die Zusammenfassung von Arbeitssystemen, auf denen Fertigungs- und Montageprozesse, als auch für solche, auf denen Qualitätssicherungsprozesse durchgeführt werden. Das vorliegende Fertigungsprinzip, d. h. die Organisationsform der zu modularisierenden Arbeitssysteme (vgl. Abschnitt 2.2.3), wird dabei nicht verändert. Sofern beispielsweise eine Organisation nach dem Verrichtungsprinzip vorliegt, erfolgt im Zuge der Modularisierung keine Substitution durch das Fließprinzip. Die steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung soll auf bestehende Produktionsstrukturen und deren spezifische Produktionsprozesse angewendet werden können. Parallele oder sequentielle Materialflüsse und Verknüpfungen zwischen Arbeitssystemen sowie existierende Verzweigungen, Zusammenführungen und Rück-

6 Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung

flüsse werden nicht zwangsläufig aufgelöst, jedoch kann eine Anpassung der Produktionsabläufe und des Layouts die Prozessorientierung und damit eine verbesserte logistische Zielerreichung innerhalb des Moduls fördern. Die Materialflüsse zwischen den Produktionsmodulen können, wie die Arbeitssysteme selbst, 1:1-, n:1- oder 1:n-Verknüpfungen aufweisen.

Jedes Produktionsmodul verfügt über einen definierten Eingang und einen definierten Ausgang sowie über einen SAS-Mitarbeiterdialog (vgl. Abschnitt 5.2). Durch die Echtzeit-Generierung aktueller Auftragsinformationen mittels der RFID-basierten Erfassung aller modulbezogenen Zu- und Abgänge soll die Komplexität der Produktionssteuerung beherrscht und die logistische Zielerreichung gesteigert werden (vgl. Abbildung 18).

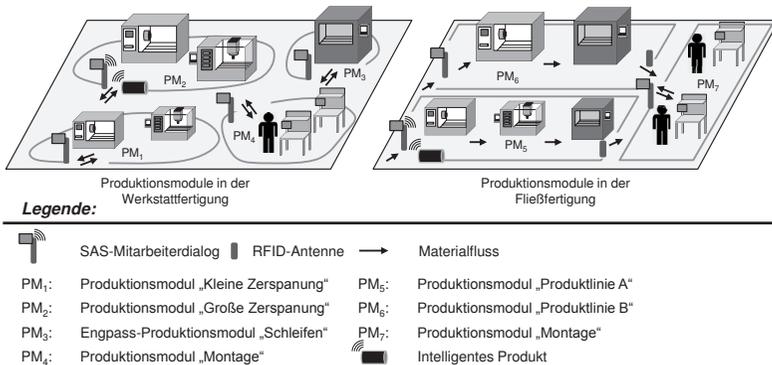


Abbildung 18: Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung in der Werkstatt- und Fließfertigung (Beispiel)

Die Datenbereitstellung erfolgt an jedem Produktionsmodul mittels der Implementierung modulrelevanter Komponenten (z. B. Antennen) des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements (vgl. Abschnitt 5.2) und der damit verbundenen automatischen Identifikation von zu bearbeitenden sowie abgeschlossenen Produktionsaufträgen unter Einsatz des intelligenten Produktes. Die so geschaffene hohe Informationstransparenz liefert damit sowohl die Grundlage zur Messung des aktuellen Umlaufbestands und Auftragsrückstands innerhalb eines Moduls als auch des Fertigstellungsgrads von Teilumfängen eines Produktionsauftrags. Auf dieser Datenbasis erfolgt die Entwicklung und Implementierung der situationsbasierten Produktionssteuerungsverfahren (vgl. Abschnitt 5.2).

Aufgrund der Tatsache, dass die Termintreue eines Produktionsmoduls unmittelbaren Einfluss auf die gesamte Termintreue eines Produktionssystems und damit auf die Kundenlieferreue hat, erscheint es aus Sicht der logistischen Zielerreichung sowie dem damit verbundenen Controlling sinnvoll, die Verantwortung der termintreuen Fertigstellung modulspezifischer Bearbeitungsschritte eines

Auftrags dem jeweiligen Produktionsmodul zu übertragen. Hierdurch werden zwischen den einzelnen Produktionsmodulen interne *Kunden-Lieferanten-Beziehungen* geschaffen, die dem Gedanken eines schlanken Produktionssystems entsprechen und die die Mitarbeitermotivation durch eine gewisse Autonomieerhöhung jedes Produktionsmoduls steigern (KÜNZEL 2012).

Darüber hinaus ermöglicht das Vorgehen zur steuerungorientierten Produktionsmodularisierung, unter Berücksichtigung der globalen logistischen Zielsetzung (z. B. hohe Termintreue), gezielt Freiheitsgrade zur *Selbstoptimierung* auf der Modulebene zu schaffen. Modulverantwortliche (z. B. Meister) werden durch den SAS-Mitarbeiterdialog in die Lage versetzt, eigenständig Steuerungsentscheidungen zu treffen, die Produktionsabläufe innerhalb des Moduls in einem vorgegebenen Rahmen zu beeinflussen (Reihenfolgebildung, Umplanung auf ein redundantes Arbeitssystem etc.) und sich so entsprechend der aktuellen Produktionssituation innerhalb des Moduls selbst zu optimieren.

Das steuerungorientierte Modularisierungsvorgehen gibt Prinzipien vor, die bei der logischen Zusammenfassung von Arbeitssystemen zu Produktionsmodulen anzuwenden sind. Um sicherzustellen, dass die Modularisierung aus Sicht der Produktionssteuerung und damit steuerungorientiert erfolgt, werden nachfolgend sogenannte *Modularisierungsprinzipien* definiert. *Produktbezogene* Prinzipien (Abschnitt 6.2), die der Reduzierung der Materialflusskomplexität dienen und die Basis der konventionellen Produktionsmodularisierung darstellen, werden derart adaptiert, dass sie bei ihrer Ausführung eine effiziente Produktionssteuerung fördern. Diese Prinzipien werden um *ressourcen-* und *steuerungsbezogene* Prinzipien (vgl. Abschnitte 6.3 und 6.4) erweitert und stellen ebenfalls die steuerungorientierung des Modularisierungsvorgehens sicher. Die ressourcenbezogenen Prinzipien fokussieren dabei im Wesentlichen auf den Engpasscharakter und die fertigungstechnische Abhängigkeit von Arbeitssystemen in einem Produktionssystem. Die steuerungbezogenen Prinzipien schaffen eine für die Steuerungsverfahren adäquate Modulgröße (Anzahl Arbeitssysteme innerhalb eines Produktionsmoduls) und Modulanzahl, wodurch garantiert wird, dass die steuerungsrelevanten modulspezifischen Auftragsinformationen rechtzeitig und in der notwendigen Granularität der Produktionssteuerung zur Verfügung gestellt werden.

Das Modularisierungsvorgehen beschreibt keinen streng sequentiellen Ablauf, sondern gibt Prinzipien vor, die zum Erreichen einer steuerungorientierten Produktionsmodularisierung zu beachten, wiederholt anzuwenden und im Falle konkurrierender Modularisierungsentscheidungen gegeneinander abzuwägen sind. Nichtsdestotrotz ist es sinnvoll, die produktbezogene Modularisierung initial vorzunehmen, bevor die Anwendung der ressourcen- und darauffolgend der steuerungbezogenen Prinzipien erfolgt (vgl. Abbildung 19).

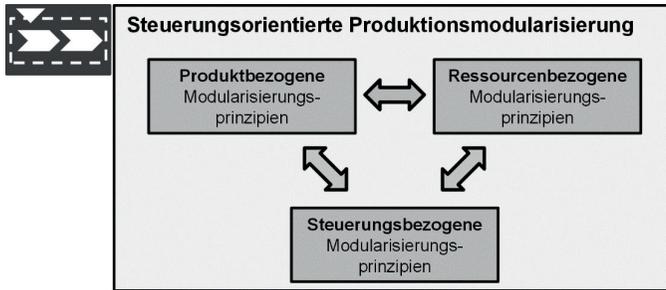


Abbildung 19: Prinzipien für die steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung

6.2 Produktbezogene Modularisierungsprinzipien

6.2.1 Allgemeines

Zur Erreichung einer geringen Materialflusskomplexität wird in vielen Forschungsarbeiten die Produktionsmodularisierung vorgeschlagen. Diese erfolgt meist, wie in Abschnitt 4.2.4 beschrieben, auf Basis der Struktur der herzustellenden Produkte. Da eine geringe Materialflusskomplexität, die mit einer hohen Prozessorientierung einhergeht, als ein Befähiger für die zielgerichtete Steuerung von Produktionsabläufen gilt (OSTGATHE 2012, STÜRMAN 2012), muss die hier zu entwickelnde steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung ebenfalls für eine hohe Prozessorientierung mit möglichst gerichteten Materialflüssen sorgen. Aus diesem Grund stellen die steuerungsorientierte Adaption und der Einsatz produktbezogener Prinzipien eine adäquate Ausgangsbasis für die Steuerungsorientierung im Zuge der Modularisierung dar, wengleich die logische und nicht zwangsläufig die physische Zusammenfassung von Arbeitssystemen im Fokus steht.

6.2.2 Modularisierung durch Produkt-Arbeitssystem-Matrix

Um das Ziel einer geringen Materialflusskomplexität zu erreichen, wird eine sogenannte *Produkt-Arbeitssystem-Matrix* eingeführt, in der die für die Produktion des gesamten Produktspektrums relevanten Arbeitssysteme gelistet werden. Voraussetzung für den Einsatz stellen aktuelle Arbeitspläne für die Fertigung, Montage und Qualitätssicherung dar, die im Rahmen der zur Produktionsplanung gehörigen Arbeitsvorbereitung zu erstellen sind (SCHUH & GIERTH 2006). Für die produktbezogene Produktionsmodularisierung sind dabei im Speziellen die für einen Bearbeitungsschritt bzw. Arbeitsvorgang (AV) einzusetzenden Arbeitssysteme auszuweisen. Insbesondere ist es für die Erstellung der Produkt-

6.2 Produktbezogene Modularisierungsprinzipien

Arbeitssystem-Matrix entscheidend, dass für einen Arbeitsvorgang alternativ mögliche, sogenannte *redundante Arbeitssysteme*, auf dem Arbeitsplan benannt werden. Als Gestaltungsgrundlage für die ressourcen- und steuerungsbezogenen Prinzipien (vgl. Abschnitte 6.3 und 6.4) erfolgt in der Matrix zusätzlich, unter Einsatz von in der Produktionsplanung zu erhebenden Planungsgrößen, die Angabe von mittleren Durchlaufzeiten je Produktkomponente P_{xy} ($ZDL_{m,xy}$) und der mittleren Auslastung (A_m) je Arbeitssystem (vgl. Tabelle 1) (ENGELHARDT et al. 2013).

Tabelle 1: Beispielhafte Produkt-Arbeitssystem-Matrix (ENGELHARDT et al. 2013)

		P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{21}	P_{22}	A_m
AS_1	Drehen	AV ₁		AV ₁	AV ₁		78%
AS_2	Drehen	AV ₁			AV ₁		80%
AS_3	Drehen		AV ₁			AV ₁	74%
AS_4	Fräsen	AV ₂		AV ₂	AV ₂		85%
AS_5	Fräsen		AV ₂		AV ₂		82%
AS_6	Schleifen	AV ₃	AV ₃	AV ₃		AV ₂	96%
AS_7	Schleifen				AV ₃		65%
AS_8	Prüfen	AV ₄	AV ₄		AV ₄		94%
$ZDL_{m,xy}$ [hh:mm]		19:35	13:05	23:25	25:30	19:35	

Legende:

AS_i :	Arbeitssystem i		Redundante Arbeitssysteme
P_j :	Komponente j von Produkt i		Parallele, produktübergreifende Prozesskette
ZDL_m :	mittlere Durchlaufzeit		
A_m :	mittlere Auslastung		
AV_i, AV'_i :	Arbeitsvorgang i		

Annahme: gleichmäßige Auslastung redundanter Arbeitssysteme

Die einzelnen Zellen der Matrix enthalten alle Arbeitsvorgänge (AV_x), die zur Herstellung eines bestimmten Produktes bzw. einer Produktkomponente auf den relevanten Arbeitssystemen durchzuführen sind. Im Falle von Montageprozessen wird der entsprechende Arbeitsvorgang jeder zu montierenden Produktkomponente zugeordnet. Sofern auf den Arbeitsplänen redundante Arbeitssysteme für einen bestimmten Arbeitsvorgang ausgewiesen sind, wird dieser Arbeitsvorgang (AV'_x) mehrfach in der Matrix notiert. Die Zusammenfassung redundanter Arbeitssysteme in einem Produktionsmodul unter Einsatz der Matrix bildet das erste produktbezogene Modularisierungsprinzip. Es stellt die Grundlage dezentraler, situationsbasierter Steuerungsentscheidungen zur Arbeitssystembelegung auf Modulebene dar (ENGELHARDT et al. 2013).

Bei spaltenweiser Betrachtung der Produkt-Arbeitssystem-Matrix wird deutlich, dass mittels der Matrix *parallele Prozessketten*, d. h. Produktionsabläufe unterschiedlicher Produkte bzw. Produktkomponenten, die auf gleichen oder ähnlichen Arbeitssystemen bearbeitet werden, leicht identifizierbar sind (vgl. Tabelle 1). Zur Schaffung einer geringen Materialflusskomplexität und einer hohen Fle-

xibilität zur dezentralen Steuerung der Produktionsaufträge innerhalb des Moduls, sollten die relevanten Arbeitssysteme dieser parallelen Prozessketten ebenfalls, als weiteres Modularisierungsprinzip, in einem Produktionsmodul zusammengefasst werden (ENGELHARDT et al. 2013).

Ab einer gewissen Anzahl von herzustellenden Produkten bzw. Produktkomponenten und den hierfür jeweils notwendigen Arbeitssystemen, können die reine Matrixbetrachtung und der spaltenweise Vergleich zur Identifikation paralleler Prozessketten aufwändig und ungenau werden. In diesem Fall kann die Produkt-Arbeitssystem-Matrix genutzt werden, um eine systematische Ähnlichkeitsanalyse durchzuführen. Aufgrund der hohen Anwendungsorientierung und weiterer adäquater Eigenschaften, die im nachfolgend verdeutlicht werden, wird das statistische Verfahren der sogenannten *hierarchisch-agglomerativen Clusteranalyse* (JÄGER et al. 2001, HASTIE et al. 2009, BACHER et al. 2010) herangezogen und als produktbezogenes Modularisierungsprinzip für die steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung adaptiert.

6.2.3 Modularisierung durch produktbezogene Clusteranalyse

Das Ziel der hierarchischen Clusteranalyse ist das Aufdecken von Ähnlichkeiten zwischen Objekten einer Grundgesamtheit und die Zusammenfassung bzw. Fusionierung von ähnlichen Objekten zu Teilmengen, den sogenannten Clustern. Objekte eines Clusters weisen somit zueinander eine höhere Ähnlichkeit auf als zu den Objekten eines anderen Clusters. Die Hierarchie bei der Clusterbildung besteht darin, dass zu Beginn jedes Objekt ein eigenes Cluster bildet. Diese Cluster werden dann solange zu größeren fusioniert, bis alle Objekte Teil eines großen Clusters sind. Somit wird stufenweise eine zunehmend gröbere Cluster-Hierarchie erzeugt und der Anwender kann selbst entscheiden, welche Cluster-Struktur bzw. Partition er wählt. Die theoretischen Grundlagen zur hierarchischen Clusteranalyse als Basis dieses produktbezogenen Modularisierungsprinzips sind beispielsweise in WIENDAHL (1996b), GRIMMER & MUCHA (1998), JÄGER et al. (2001), HASTIE et al. (2009) und BACHER et al. (2010) zu finden.

Im Rahmen dieses Prinzips für die steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung werden die Objekte durch die Arbeitssysteme einer Produktion repräsentiert, die zu Clustern, den Produktionsmodulen, zusammengefasst werden. Die Ähnlichkeit zwischen den Arbeitssystemen erklärt sich über die Produkte, die auf ihnen bearbeitet werden. Somit unterscheidet sich diese produktbezogene Clusteranalyse von der im Rahmen der Fabrikplanung eingesetzten, bei der die Produkte anhand ihrer Ähnlichkeitsmerkmale (z. B. Geometrie, Werkstoff, Technologie) zu Produktfamilien gruppiert werden (SCHRAFT et al. 1996). Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal zur Fabrikplanung stellt die binäre Datenbasis bei der vorliegenden Clusteranalyse dar, die angibt, ob ein Produkt- bzw. eine Produktkomponente auf einem Arbeitssystem bearbeitet werden kann (Merkmalsausprä-

6 Steuerungorientierte Produktionsmodularisierung

stimmen. P bezeichnet die Anzahl der in einer Produktion herzustellenden Produkte bzw. Produktkomponenten:

$$PM_1 = (1, 0, 1, 1, 0)$$

Dieses beispielhafte P -Tupel gibt für das Produktionsmodul PM_1 an, dass die Produktkomponenten P_{11} , P_{13} und P_{21} in diesem Modul bearbeitet werden (vgl. Tabelle 2). Der paarweise Vergleich je zweier Tupel erlaubt die Bestimmung der sogenannten *Distanz* d zwischen zwei Produktionsmodulen, aus der sich die *Distanzmatrix* der betrachteten Produktion ableiten lässt.

Als Berechnungsgrundlage der Distanz zweier Produktionsmodule wird in einem ersten Schritt eine sogenannte Kontingenztabelle für je zwei der P -Tupel erstellt (vgl. Tabelle 3). Hierfür werden alle Komponenten der beiden betrachteten Tupel paarweise miteinander verglichen und die Zellen der Kontingenztabelle entsprechend ausgefüllt. Beispielsweise beschreibt der Zellenwert $A_{11} = 2$ (vgl. Tabelle 3, rechts), dass die Tupel der Produktionsmodule PM_1 und PM_2 hinsichtlich der Bearbeitung zweier Produktkomponenten (P_{11} , P_{21}) übereinstimmen (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 3: Schematische und beispielhafte Kontingenztabelle

		Ausprägung PM_b					Ausprägung PM_2	
		0	1				0	1
Ausprägung PM_a	0	A_{00}	A_{01}	$A_{0\#}$	Ausprägung PM_1	0	1	
	1	A_{10}	A_{11}	$A_{1\#}$		2	0	2
		$A_{\#0}$	$A_{\#1}$	P		1	2	3
						3	2	5

Legende:

- PM_k : Produktionsmodul k
- A_{00} : Anzahl der Wertepaare mit $PM_{a,i} = 0$ und $PM_{b,i} = 0$
- A_{11} : Anzahl der Wertepaare mit $PM_{a,i} = 1$ und $PM_{b,i} = 1$
- A_{10} : Anzahl der Wertepaare mit $PM_{a,i} = 1$ und $PM_{b,i} = 0$
- A_{01} : Anzahl der Wertepaare mit $PM_{a,i} = 0$ und $PM_{b,i} = 1$
- $A_{1\#}$, $A_{0\#}$: Anzahl der Einsen und Nullen in PM_a (Zeilensummen)
- $A_{\#1}$, $A_{\#0}$: Anzahl der Einsen und Nullen in PM_b (Spaltensummen)
- P : Anzahl der herzustellenden Produktkomponenten

Da es sich um binäre Merkmalsausprägungen handelt, eignet sich als Distanzmaß zweier Produktionsmodule die sogenannte *Jaccard-Distanz* d_j . Diese berücksichtigt das Verhältnis der Produkte bzw. Produktkomponenten, die von beiden betrachteten Produktionsmodulen bearbeitet werden (jeweils Merkmalsausprägung 1), zu allen von diesen Modulen herzustellenden Produkten bzw. Produktkomponenten:

$$d_j(PM_a, PM_b) = 1 - \frac{A_{11}}{P - A_{00}} = \frac{A_{01} + A_{10}}{A_{01} + A_{10} + A_{11}} \quad (1)$$

mit $d_j(PM_a, PM_b)$: Jaccard-Distanz zwischen den Modulen PM_a und PM_b

A_{00} Anzahl der Wertepaare mit $PM_{a,i} = 0$ und $PM_{b,i} = 0$

A_{11} Anzahl der Wertepaare mit $PM_{a,i} = 1$ und $PM_{b,i} = 1$

6.2 Produktbezogene Modularisierungsprinzipien

- A_{10} Anzahl der Wertepaare mit $PM_{a,i} = 1$ und $PM_{b,i} = 0$
- A_{01} Anzahl der Wertepaare mit $PM_{a,i} = 1$ und $PM_{b,i} = 0$
- P Anzahl der herzustellenden Produkte bzw. Produktkomponenten

Die Jaccard-Distanz gewichtet somit die Tatsache, dass ein Produkt bzw. eine Produktkomponente von beiden Produktionsmodulen bearbeitet wird, stärker als die Tatsache, dass zwei Produktionsmodule ein Produkt bzw. eine Produktkomponente nicht bearbeiten (jeweils Merkmalsausprägung 0). Für das genannte Beispiel (vgl. Tabelle 3, rechts) gilt $d_j = 1/3$.

2. Fusionierung zweier Produktionsmodule

Nach der Berechnung aller Distanzen zwischen je zwei Produktionsmodulen, erfolgt im Rahmen der Fusionierung die Erstellung der sogenannten Distanzmatrix, in der die paarweisen Distanzen strukturiert zusammengefasst werden. Die ermittelte Distanzmatrix stellt die Grundlage zur Identifikation von zu fusionierenden Produktionsmodulen dar. Hierzu erfolgt die Suche nach den beiden Produktionsmodulen mit der geringsten Distanz bzw. der größten Ähnlichkeit zueinander. Tabelle 4 zeigt, dass in diesem Beispiel die Produktionsmodule PM_1 und PM_4 im ersten Schritt zu einem Produktionsmodul zusammengefasst werden können. Dieser Fusionierungsschritt entspricht dem in Tabelle 1 dargestellten Modularisierungsprinzip zur Zusammenfassung paralleler Prozessketten.

Tabelle 4: Beispielhafte Distanzmatrix

$d_j(PM_a, PM_b)$	PM_1	PM_2	PM_3	PM_4	PM_5	PM_6	PM_7	PM_8
PM_1								
PM_2	0,33							
PM_3	1,00	1,00						
PM_4	0,00	0,33	1,00					
PM_5	0,75	0,67	0,67	0,75				
PM_6	0,60	0,80	0,50	0,60	0,80			
PM_7	0,67	0,50	1,00	0,67	0,50	1,00		
PM_8	0,50	0,33	0,75	0,50	0,33	0,60	0,67	

Legende:

$d_j(PM_a, PM_b)$: Jaccard-Distanz zwischen PM_a und PM_b
 PM_i : Produktionsmodul i

3. Adaption der Distanzmatrix

Nach der Zusammenfassung zweier Produktionsmodule PM_a und PM_b , muss die Distanzmatrix bezüglich der neuen Modulstruktur adaptiert werden. Da es aus Sicht der Produktionssteuerung sinnvoll ist, möglichst homogene und kompakte Produktionsmodule zu generieren, wird im Rahmen dieses produktbezogenen Modularisierungsprinzips das sogenannte *Complete-Linkage-Verfahren* angewandt. Dieses Verfahren zieht bei der Adaption der Distanzmatrix die maximale

6 Steuerungorientierte Produktionsmodularisierung

Distanz zwischen dem neu geschaffenen Produktionsmodul PM_c und den bestehenden heran:

$$d_j(PM_c, PM_d) = \max(d_j(PM_a, PM_d), d_j(PM_b, PM_d)) \quad (2)$$

mit $PM_c = PM_a \cup PM_b$
 $c := \min\{a, b\}$

Tabelle 5 zeigt die adaptierte Distanzmatrix, welche unter Einsatz des Complete-Linkage-Verfahrens beispielhaft ermittelt werden konnte.

Tabelle 5: Beispielhafte adaptierte Distanzmatrix

$d_j(PM_a, PM_b)$	PM ₁	PM ₂	PM ₃	PM ₅	PM ₆	PM ₇	PM ₈
PM ₁							
PM ₂	0,33						
PM ₃	1,00	1,00					
PM ₅	0,75	0,67	0,67				
PM ₆	0,60	0,80	0,50	0,80			
PM ₇	0,67	0,50	1,00	0,50	1,00		
PM ₈	0,50	0,33	0,75	0,33	0,60	0,67	

Legende:

$d_j(PM_a, PM_b)$: Jaccard-Distanz zwischen PM_a und PM_b
 PM_k : Produktionsmodul k

Sofern noch nicht alle Arbeitssysteme bzw. Produktionsmodule Teil eines Clusters sind, werden die Schritte 2 und 3 des Algorithmus zur produktbezogenen Modularisierung wiederholt durchgeführt.

Zur grafischen Verdeutlichung der schrittweise durchgeführten Fusionierungen und der erzeugten Hierarchie-Struktur lässt sich ein sogenanntes *Dendrogramm* erstellen (vgl. Abbildung 21). Dieses unterstützt den Anwender bei der Bestimmung einer aus Sicht der Produktionssteuerung geeigneten Partition unter Berücksichtigung der jeweiligen Modulgrößen und Modulanzahl sowie des *relevanten Heterogenitätszuwachses*. Dieser Heterogenitätszuwachs erlaubt die Identifikation einer zunehmenden Unähnlichkeit von Arbeitssystemen in einem Produktionsmodul entlang der Hierarchie-Struktur. Eine aus Sicht der Produktionssteuerung adäquate Partition liegt dann vor, wenn in einem Produktionsmodul ein durch die Zusammenfassung von Arbeitssystemen ausreichender Freiheitsgrad zur Selbstoptimierung herrscht und gleichzeitig die Steuerungskomplexität zur Erreichung der angestrebten logistischen Zielgrößen beherrschbar bleibt. Im dargestellten Beispiel wurde der Heterogenitätszuwachs auf 0,5 festgelegt, woraus sich die entsprechende Produktionsmodularisierung ableitet.

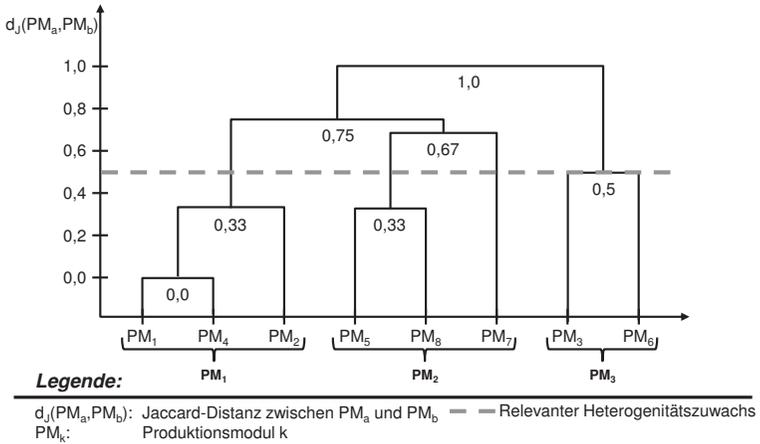


Abbildung 21: Beispielhaftes Dendrogramm und Modularisierungsvorschlag

Die in diesem Abschnitt eingeführten produktbezogenen Prinzipien zur steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung stellen eine geeignete Basis zur Entwicklung weiterer, den ressourcen- und steuerungsbezogenen, Modularisierungsprinzipien dar, die in den folgenden Abschnitten 6.3 und 6.4 eingeführt werden.

6.3 Ressourcenbezogene Modularisierungsprinzipien

6.3.1 Allgemeines

Das Ziel der ressourcenbezogenen Prinzipien zur steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung ist die Berücksichtigung von ressourcenspezifischen Eigenschaften. Hierzu zählen inhärente Prozessabhängigkeiten, die eine Modularisierung von Arbeitssystemen aufgrund ihres fertigungstechnischen Charakters zwingend erfordern. Des Weiteren haben aus Sicht der Produktionssteuerung Engpass-Arbeitssysteme einen besonderen Stellenwert, da diese, entgegen der Forderung nach einer terminorientierten Steuerung, meistens auslastungsorientiert gesteuert werden müssen. Darüber hinaus gilt es über die ressourcenbezogenen Modularisierungsprinzipien sicherzustellen, dass die Bereitstellung von Produktkomponenten an Montage-Arbeitssystemen synchron und damit bestandsminimal erfolgen kann.

6.3.2 Modularisierung nach fertigungstechnischen Abhängigkeiten

Fertigungstechnische Abhängigkeiten werden bereits in der Produktentwicklung bestimmt und müssen vor allem bei der Verknüpfung von einzelnen Fertigungstechnologien zu Technologieketten berücksichtigt werden. Diese Abhängigkeiten lassen sich in drei sogenannte Restriktionstypen untergliedern (KNOCHE 2005):

- Werkstoffrestriktionen
- Geometrierestriktionen
- Vollständigkeitsrestriktionen

Als ressourcenbezogenes Modularisierungsprinzip leitet sich daraus ab, dass Arbeitssysteme, die eine fertigungstechnische Prozessabhängigkeit im Sinne der *Vollständigkeitsrestriktion* zueinander aufweisen, in einem Produktionsmodul zusammengefasst werden sollten. Vollständigkeitsrestriktionen werden im Speziellen bei der Technologieverknüpfung betrachtet, um Prozessabhängigkeiten zwischen den spezifischen Eigenschaften von einzelnen Fertigungstechnologien zu berücksichtigen (KNOCHE 2005). Die Motivation für dieses Prinzip wird insbesondere deutlich, wenn die Vollständigkeitsrestriktion zusätzlich über einen zeitlichen Charakter verfügt, der die Intensität der Prozessabhängigkeit zusätzlich steigert. Dies ist beispielsweise bei einer Technologiekette mit einem Wärmebehandlungs- und einem Aufschumpfprozess der Fall. Darüber hinaus ist es aus aufbau- und ablauforganisatorischen Gründen sinnvoll, die Modulverantwortung und die Prozessverantwortung in einem Produktionsmodul zu vereinen, was dieses Modularisierungsprinzip zusätzlich bekräftigt.

6.3.3 Modularisierung von Engpass-Arbeitssystemen

Sofern eine Produktionsumgebung über Engpass-Arbeitssysteme verfügt, erfordern diese eine besondere Berücksichtigung im Rahmen der steuerungorientierten Produktionsmodularisierung, da sie maßgeblich die logistischen Zielgrößen, v. a. Durchlaufzeit und Termintreue, beeinflussen. Bestehende Ansätze zur Produktionssteuerung schlagen sogar die vollständige Ausrichtung der Steuerungsverfahren an den Engpass-Arbeitssystemen vor. Um diesem wichtigen Aspekt im Zuge der Produktionsmodularisierung gerecht zu werden, gilt es ein engpassorientiertes Modularisierungsprinzip zu definieren. Demzufolge werden Engpass-Arbeitssysteme in einem eigenen *Engpass-Produktionsmodul* logisch zusammengefasst, was den Modulverantwortlichen die Möglichkeit einräumt, in einem vorgegebenen logistischen Rahmen (z. B. Einhaltung von Terminschränken), Ablaufoptimierungen vorzunehmen, um beispielsweise den Durchsatz der Engpass-Arbeitssysteme zu maximieren. Darüber hinaus lässt sich über das RFID-basierte hybride Informationsmanagement (vgl. Abschnitt 5.2) der aktuelle Auftragsstatus im Engpass-Produktionsmodul kontinuierlich und betriebsparallel überwachen. Hierdurch lassen sich Materialflussabrisse, die Engpass-Arbeits-

systeme im besonderen Maße beeinflussen, frühzeitig identifizieren und entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten.

Zur Bestimmung bzw. Identifikation der Engpass-Arbeitssysteme kann die in Abschnitt 6.2.2 eingeführte Produkt-Arbeitssystem-Matrix (vgl. Tabelle 1) genutzt werden, welche für alle eingesetzten Arbeitssysteme einer Produktionsumgebung die mittleren Auslastungen A_m ausweist. Aus betriebsorganisatorischen Gründen kann es ab einer gewissen Anzahl an Engpass-Arbeitssystemen sinnvoll sein, mehrere Engpass-Produktionsmodule zu instanziiieren.

Die mittlere Auslastung eines Arbeitssystems ergibt sich aus der Division der mittleren Belastung BEL_m durch die verfügbare mittlere Leistung L_m :

$$A_m = \frac{BEL_m}{L_m} \cdot 100 \quad (3)$$

mit A_m mittlere Auslastung [%]
 BEL_m mittlere Belastung [Std/BKT]
 L_m mittlere Leistung [Std/BKT]

Die mittlere Leistung bezeichnet dabei die mittlere verfügbare Kapazität eines Arbeitssystems, die sich durch die Berücksichtigung des restriktiven Kapazitätsfaktor (Betriebsmittel oder Personal) bestimmen lässt. Die mittlere Belastung wird durch den Auftragszugang eines Arbeitssystems und damit über den mittleren Umlaufbestand in der Produktion ermittelt. (NYHUIS & WIENDAHL 2003, LÖDDING 2008, STÜRMANN 2012)

6.3.4 Modularisierung von Montage-Arbeitssystemen

Um die Bereitstellung von zu montierenden Produktkomponenten an einem Arbeitssystem mit minimalen Übergangszeiten (v. a. Liegezeiten) und damit bestandsminimal und synchron realisieren zu können, ist die *Anordnung von Montage-Arbeitssystemen* in einem Produktionsmodul als weiteres ressourcenbezogenes Modularisierungsprinzip zu spezifizieren. Als Grundlage hierfür dienen die in Abschnitt 2.2.3 eingeführten Organisationsformen in der Montage.

Sofern eine nach dem Fließprinzip organisierte Reihenmontage vorliegt, bei der die zu montierenden Produktkomponenten gerichtet von einer Montagestation zur nächsten bewegt werden, erfolgt die Zusammenfassung aller Arbeitssysteme, die zu dieser Reihenmontage zählen, zu einem Produktionsmodul. Demnach bildet das erste Montage-Arbeitssystem in einem solchen Produktionsmodul den Modulzugang und das letzte den Modulabgang, an denen die Montageaufträge jeweils durch das RFID-basierte hybride Informationsmanagement identifiziert werden. Ähnliches gilt für die Fließmontage, bei der zusätzlich ein Taktzwang herrscht und die Weitergabe der Produktkomponenten periodisch erfolgt. Alle

Montage-Arbeitssysteme, die dem gleichen Takt unterliegen, werden gemäß diesem Modularisierungsprinzip zu einem Produktionsmodul gruppiert.

Erfolgt eine Montage von Produktkomponenten nach dem Werkbankprinzip, bei dem Produkte häufig an einem Arbeitssystem komplett montiert werden, sind diese Arbeitssysteme, unter Berücksichtigung der jeweiligen Mitarbeiterqualifikationen, zu einem Produktionsmodul zusammenzufassen. Aufgrund der Tatsache, dass aus Produktsicht die Arbeitssysteme, deren Mitarbeiter gleiche oder ähnliche Qualifikationen aufweisen, als redundant betrachtet werden können, wird die Anwendung der produktbezogenen Prinzipien (vgl. Abschnitt 6.2.2) zu einer vergleichbaren Modularisierungsempfehlung kommen.

Aufbauend auf den produkt- und ressourcenbezogenen Modularisierungsprinzipien werden im Folgenden steuerungsbezogene Prinzipien definiert. Diese schaffen zusammen die betriebsorganisatorische Basis zur Implementierung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements und für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten situationsbasierten Steuerungsverfahren.

6.4 Steuerungsbezogene Modularisierungsprinzipien

6.4.1 Allgemeines

Die situationsbasierten Steuerungsverfahren des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems zur situationsbasierten Produktionssteuerung orientieren sich an den Steuerungsaufgaben nach LÖDDING (2008) (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die steuerungsbezogenen Modularisierungsprinzipien des vorliegenden Abschnitts nehmen dabei unmittelbaren Bezug auf die Zielsetzung und die Funktionsweise dieser Verfahren, was eine entsprechende Gliederung der Prinzipien nach Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung motiviert.

6.4.2 Modularisierung zur synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe

Das Steuerungsverfahren synchrone zweistufige Auftragsfreigabe verfolgt das Ziel, die Produktion der Komponenten eines zu montierenden Produktes zu synchronisieren (vgl. Abschnitt 5.2). Ein sogenannter Synchronisationspunkt wird dabei durch einen RFID-Identifikationspunkt am Ausgang bzw. am letzten Arbeitssystem eines Produktionsmoduls repräsentiert. Durch die zielgerichtete Definition dieser Synchronisationspunkte im Produktionsablauf sollen Liegezeiten und Umlaufbestände im Vergleich zur konventionellen, einstufigen Auftragsfreigabe reduziert werden. Abbildung 22 verdeutlicht schematisch die zeitliche Situation, wie diese häufig im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung unter

6.4 Steuerungsbezogene Modularisierungsprinzipien

Einsatz einer konventionellen Auftragsfreigabe von zu montierenden Produktkomponenten vorzufinden ist.

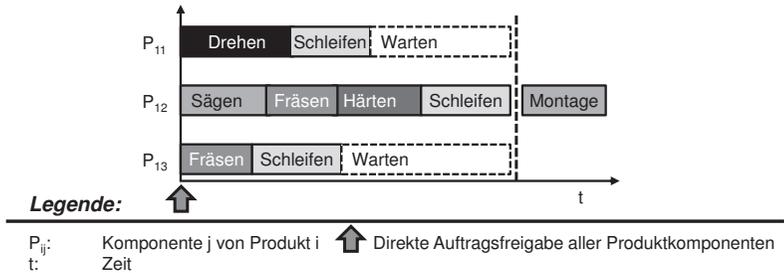


Abbildung 22: Schematische Darstellung der Durchlaufzeiten bei der konventionellen, nicht synchronisierenden Auftragsfreigabe

Zur Bestimmung der Synchronisationspunkte ist in einem ersten Schritt die *Kategorisierung der zu montierenden Produktkomponenten*, im Sinne des ersten steuerungsbezogenen Modularisierungsprinzips, erforderlich. Dabei wird zwischen sogenannten Haupt- und Nebenkomponenten eines zu montierenden Produktes unterschieden. Die Bearbeitung der Nebenkomponenten wird durch die dazugehörige Hauptkomponente synchron angestoßen, sobald der Synchronisationspunkt, im Sinne eines definierten Bearbeitungsfortschritts, von der Hauptkomponente erreicht wird. Die Kategorisierungskriterien für die Haupt- und Nebenkomponenten variieren in Abhängigkeit dessen, ob es sich um zu synchronisierende Fertigungs- oder Montageprozesse handelt.

Im Falle zu synchronisierender Montageprozesse (z. B. getaktete Fließmontage) stellt der Montagevorranggraph eine geeignete Grundlage zur Produktkategorisierung dar. Abbildung 23 zeigt beispielhaft den vereinfachten Montagevorranggraphen eines Fahrzeugsitzes sowie die daraus abgeleitete Kategorisierung.

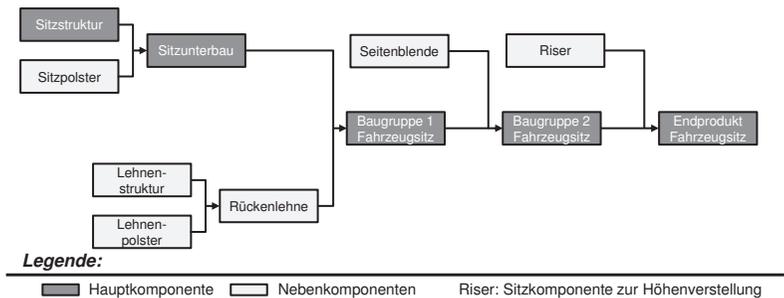


Abbildung 23: Beispielhafter Montagevorranggraph und Produktkategorisierung

6 Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung

Unter einer Hauptkomponente wird dabei ein Bauteil verstanden, an das die zugehörigen NebenkompONENTEN gemäß der vorgegebenen Montagereihenfolge während der Produktion montiert werden. Im Falle komplexer, mehrstufiger Montageprozesse kann es zusätzlich sinnvoll sein, die Montageschritte der NebenkompONENTEN untereinander ebenfalls zu synchronisieren.

Um die steuerungsrelevanten Haupt- und NebenkompONENTEN im Falle zu synchronisierender Fertigungsprozesse (z. B. zerspanende Bearbeitung) zu definieren, können die Arbeitspläne der zu fertigenden Produktkomponenten für die Kategorisierung herangezogen werden. Eine Hauptkomponente bezeichnet in diesem Fall ein Bauteil (z. B. Grundkörper, Gehäuse), welches im Vergleich zu den entsprechenden NebenkompONENTEN (z. B. Anbauteil, Welle) über wesentlich aufwendigere Fertigungsprozesse und damit einhergehend über längere Durchführungszeiten (Rüst- und Eingriffszeiten) verfügt (vgl. Abbildung 24).

Blatt: 1	Datum: 08.04.2014 Bearbeiter: K. Steinborn	Auftragsnummer: 139154711				ARBEITSPLAN	
Stückzahl: 3	Produktionsbereich: 1-20	Produktkomponente: Antriebswelle für Zahnradgetriebe				Zeichnung: 170-0543	
Werkstoff: St 50	Rohteilform und -abmessungen: Rundmaterial 10 mm			Rohgewicht: 0,5 kg		Fertiggewicht: 0,3 kg	
AV	Arbeitsvorgangsbeschreibung	KS	LG	AS	AS'	t_r [min]	t_e [min]
10	Rundmaterial auf 80 mm Länge sägen	300	04	4101	-	30	10,0
20	Rundmaterial auf 75 mm ablängen und zentrieren	340	06	4201	-	30	2,0
30	Welle komplett drehen	360	08	4301	4303 4304	40	2,6
40	Passfedernut fräsen	400	07	4407	4408	45	5,5
50	Lagersitze schleifen	510	09	4908	-	20	6,7
60	Fertigteilprüfung	900	-	9002	-	15	3,8

Legende:

AV: Arbeitsvorgang	AS: Arbeitssystem	t _r : Rüstzeit
KS: Kostenstelle	AS': Alternative Arbeitssysteme	t _e : Eingriffszeit
LG: Lohngruppe		

Abbildung 24: Beispielhafter Arbeitsplan (EVERSHEIM et al. 1996)

Aufbauend auf der Produktkategorisierung erfolgt im zweiten Schritt, als weiteres steuerungsbezogenes Modularisierungsprinzip, die *Bestimmung der Synchronisationspunkte* und damit die Festlegung von steuerungsrelevanten Modulgrenzen auf Basis einer durchlaufzeitbasierten Vorwärts- und Rückwärtsrechnung. Hierzu ist es erforderlich, dass die mittlere Durchlaufzeit jeder zu synchronisierenden Produktkomponente P_{xy} ($ZDL_{m,xy}$), wie in der Produkt-Arbeitssystem-Matrix dargestellt (vgl. Tabelle 1), zur Verfügung steht. Ob es sich dabei um zu

synchronisierende Fertigungs- oder Montageprozesse handelt, ist für das Modularisierungsprinzip unerheblich.

Im Falle von getakteten Produktionsprozessen in einer nach dem Fließprinzip organisierten Produktion, werden die Taktzeiten der entsprechenden Produktkomponenten als Berechnungsgrundlage der komponentenspezifischen mittleren Durchlaufzeiten verwendet. Liegen seitens der Produktionsplanung ausschließlich die sich aus Rüst- und Bearbeitungszeiten ergebenden mittleren Durchführungszeiten einer Produktkomponente P_{xy} ($ZDF_{m,xy}$) und nicht die mittleren Transport- und Liegezeiten vor, was insbesondere in kleinen und mittleren produzierenden Unternehmen häufig der Fall ist, so kann die mittlere Durchlaufzeit für die Synchronisationspunktbestimmung initial überschlägig bestimmt werden. Analog dem von NYHUIS & WIENDAHL (2003) empirisch ermittelten und von LOPITZSCH (2005) erfolgreich angewandten Vorgehen zur logistischen Positionierung von Arbeitssystemen, kann die folgende Formel zur überschlägigen Bestimmung der mittleren Durchlaufzeit einer Produktkomponente P_{xy} genutzt werden:

$$ZDL_{m,xy} \approx \sum_i 2,5 \cdot ZDF_{m,xy,i} \quad (4)$$

mit $ZDL_{m,xy}$ überschlägige mittlere Durchlaufzeit der Produktkomponente P_{xy} [BKT]

$ZDF_{m,xy,i}$ mittlere Durchführungszeit der Produktkomponente P_{xy} an dem für die Produktion von P_{xy} relevanten Arbeitssystem AS_i [BKT]

Im Rahmen der Vorwärtsrechnung erfolgt, ausgehend von einem beliebigen Planungszeitpunkt TP_0 , jeweils die Bestimmung des *frühesten Montagepunktes* unter Berücksichtigung der mittleren Durchlaufzeiten der zuvor definierten Hauptkomponenten. Ausgehend von diesem frühesten Montagepunkt lassen sich per Rückwärtsrechnung, mit Hilfe der mittleren Durchlaufzeiten der Nebenkompenten, die *Synchronisationspunkte* aller für eine Hauptkomponente relevanten Nebenkompenten ableiten. Ein Synchronisationspunkt entspricht dabei dem Abschluss eines spezifischen Arbeitsvorgangs der Hauptkomponente auf einem Arbeitssystem sowie dessen informationstechnische Erfassung. Dieser spezifische Arbeitsvorgang muss dabei vor oder zum spätmöglichsten Bearbeitungsbeginn der zu diesem Synchronisationspunkt gehörigen Nebenkompente abgeschlossen sein. Je näher der Synchronisationspunkt an dem spätmöglichsten Bearbeitungsbeginn der Nebenkompente liegt, desto höher ist die erreichbare Synchronität der jeweiligen Produktionsprozesse. Der für die Synchronisation steuerungsrelevante Bearbeitungsfortschritt und Produktzustand der Hauptkomponente wird mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements echtzeitnah am Modulausgang erfasst und zur synchronen Auftragsfreigabe der jeweiligen Nebenkompenten unmittelbar verarbeitet. Aus diesem Grund muss das Arbeitssystem, auf dem der kritische Arbeitsvorgang durchgeführt wird, eine

6 Steuerungorientierte Produktionsmodularisierung

logische Modulgrenze bilden und damit das *finale Arbeitssystem im jeweiligen Produktionsmodul* darstellen. Abbildung 25 stellt die Vorwärts- und Rückwärtsrechnung zur Bestimmung der Synchronisationspunkte und damit der logischen Modulgrenzen am Beispiel zu synchronisierender Fertigungsprozesse schematisch dar.

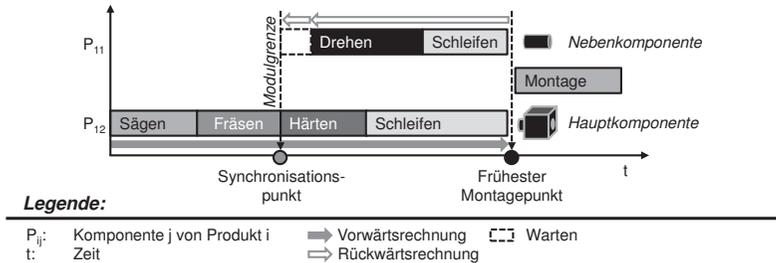


Abbildung 25: Beispielhafte Vorwärts- und Rückwärtsrechnung zur Bestimmung des Synchronisationspunktes und der logischen Modulgrenze

Die Modularisierungsprinzipien für die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe bestimmen, aufgrund der steuerungsbezogenen Notwendigkeit von komponentenspezifischen Synchronisationspunkten, das jeweils finale Arbeitssystem der zuvor nach produkt- und ressourcenbezogenen Prinzipien abgeleiteten Produktionsmodule. Damit wirken diese steuerungsbezogenen Prinzipien maßgeblich auf die jeweiligen Modulgrößen (Anzahl der Arbeitssysteme in einem Produktionsmodul) und gleichermaßen auf die Modulanzahl (Anzahl an instanziierten Produktionsmodulen) in einer Produktionsumgebung.

6.4.3 Modularisierung zur situationsbasierten Reihenfolgebildung

Die zu implementierenden Steuerungsverfahren zur Reihenfolgebildung in einem Produktionsmodul setzen je nach Modultyp auf den logistischen Zielgrößen Termintreue oder Auslastung auf (vgl. Abschnitt 5.2). Diese Tatsache erfordert die unbedingte *Trennung von Engpass-Arbeitssystemen und Nicht-Engpass-Arbeitssystemen* in unterschiedliche Produktionsmodule, was somit als steuerungsbezogenes Modularisierungsprinzip festgehalten werden kann. Dieses stimmt exakt mit dem in Abschnitt 6.3.3 eingeführten ressourcenbezogenen Prinzip zur Modularisierung von Engpass-Arbeitssystemen überein und muss aus diesem Grund an dieser Stelle nicht weiter detailliert werden.

Die nachteiligen Eigenschaften der Schlupfzeitregelung, wie beispielsweise häufige Reihenfolgevertauschungen und ungenutztes Verstreichen zur Verfügung stehender Schlupfzeit (vgl. Abschnitt 4.2.2.2), können über die intermodulare Schlupfzeitverteilung maßgeblich reduziert werden. Diese erfolgt auf Basis der drei modulspezifischen Kriterien Durchlaufzeit, Termintreue und Freiheitsgrad.

Da diese Kriterien insbesondere von dem umgesetzten Fertigungsprinzip in einem Produktionsmodul anhängig sind, soll dieses steuerungsbezogene Modularisierungsprinzip sicherstellen, dass Arbeitssysteme, die nach dem *Fließprinzip* organisiert werden, stets in einem anderen Produktionsmodul gruppiert werden als Arbeitssysteme, die dem *Verrichtungsprinzip* folgen. Somit ist gewährleistet, dass der individuelle betriebsorganisatorische Charakter eines Produktionsmoduls möglichst genau bei der Verteilung der Schlupfzeit berücksichtigt wird und diese somit anforderungsgerecht erfolgen kann.

6.4.4 Modularisierung zur intramodularen Rückstandsregelung

Die steuerungsbezogenen Modularisierungsprinzipien der Reihenfolgebildung sind den Prinzipien der intramodularen Rückstandsregelung sehr ähnlich. Die intramodulare Rückstandsregelung hat jedoch eine erhöhte Relevanz für die häufig nach dem Verrichtungsprinzip organisierte Einzel- und Kleinserienfertigung und weniger für die Fließfertigung. Deshalb ist aus Sicht dieses Steuerungsverfahrens ebenfalls das steuerungsbezogene Modularisierungsprinzip erforderlich, welches die Zusammenfassung von nach dem *Verrichtungsprinzip* organisierten Arbeitssystemen einerseits und nach dem *Fließprinzip* organisierten Arbeitssystemen andererseits strikt vermeidet (vgl. Abschnitt 6.4.3).

Die zielgerichtete Ausführung der intramodularen Rückstandsregelung erfordert eine gewisse Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter, was insbesondere in der Werkstattfertigung meist vorhanden ist und somit das zuvor beschriebene Modularisierungsprinzip bestätigt. Um jedoch die in einer Produktionsumgebung verfügbare Kapazitätsflexibilität trotz der Produktionsmodularisierung zu wahren, muss durch ein weiteres steuerungsbezogenes Prinzip abgesichert werden, dass die Produktionsmodule nicht zu klein werden. Dies bedeutet, dass die Anzahl der in einem Modul zusammengefassten Arbeitssysteme so groß sein muss, dass eine *ausreichend hohe Kapazitätsflexibilität* (Mitarbeiterflexibilität, Betriebsmittelflexibilität) im Produktionsmodul vorhanden ist, um im Zuge der intramodularen Rückstandsregelung, Rückstände der Produktionsaufträge schnell auflösen und eine möglichst hohe Modultermintreue erzielen zu können. Sofern der Bedarf eines Arbeitssystems an diesem situationsbasierten Steuerungsverfahren vorhanden sein sollte, ist die Zuordnung dieses Arbeitssystems zu einem Produktionsmodul, welches über eine ausreichend große Kapazitätsflexibilität verfügt, notwendig.

6.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde die steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung als erstes Element des Systems für die RFID-gestützte situationsbasierte Produk-

6 Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung

tionssteuerung entwickelt und detailliert. Dabei handelt es sich um ein Vorgehen zur Modularisierung einer Produktionsumgebung, welches aus Sicht der Produktionssteuerung Arbeitssysteme zur Fertigung, Montage und Qualitätssicherung logisch in sogenannten Produktionsmodulen zusammenfasst. Die Produktionsmodularisierung bildet damit die betriebsorganisatorische Basis für die Entwicklung und Implementierung der Systemelemente RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement sowie situationsbasierte Steuerungsverfahren. Das Vorgehen läuft nicht sequentiell ab, sondern basiert auf produkt-, ressourcen- und steuerungsbezogenen Modularisierungsprinzipien, die zwar in der genannten Reihenfolge sinnvollerweise angewandt werden, aber durchaus bei Modularisierungsentscheidungen konkurrieren können und im Einzelfall gegeneinander zu priorisieren sind.

Im nachfolgenden Kapitel 7 erfolgt, auf der betriebsorganisatorischen Grundlage der steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung aufbauend, die Entwicklung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements als zweites Element des Systems zur situationsbasierten Produktionssteuerung.

7 RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement

7.1 Übersicht

Das übergeordnete Ziel des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements ist die Steigerung der Informationstransparenz in der Produktion. Diese dient als informationstechnische Basis der situationsbasierten Ausführung von Produktionssteuerungsverfahren zur Erhöhung der logistischen Zielerreichung. Durch die Integration der RFID-Technologie in die betrieblichen Steuerungssysteme lässt sich unter Einsatz intelligenter Produkte eine effiziente Betriebsdatenerfassung an jedem zuvor mittels des steuerungorientierten Modularisierungsvorgehens instanziierten Produktionsmodul realisieren. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 4.3 dargestellten Eigenschaften und Vorteile hybrider Organisationsstrukturen für Steuerungssysteme in der Produktion, wurde für das RFID-basierte Informationsmanagement eine *hybride Referenzarchitektur* definiert, die sich sowohl aus zentralen als auch dezentralen Steuerungselementen zusammensetzt (vgl. Abbildung 26).

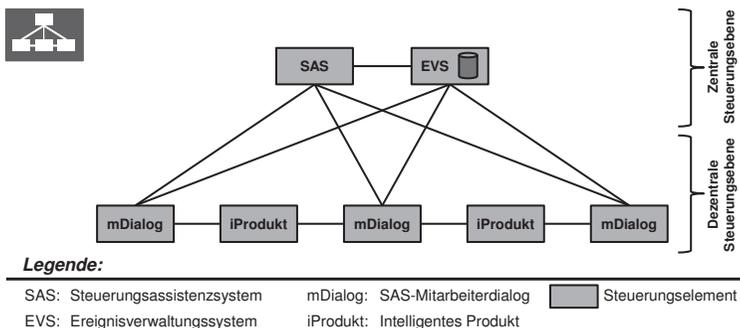


Abbildung 26: RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement
(ENGELHARDT et al. 2013)

Als zentrales Steuerungselement wird ein sogenanntes *Steuerungsassistenzsystem* (SAS) eingeführt, welches seitens der Produktionsplanung alle notwendigen Plan- und Zielvorgaben (z. B. Produktionsaufträge, Termine) erhält und welches die Ausführung der zentralen situationsbasierten Steuerungsverfahren sicherstellt. Dieses Assistenzsystem wird um ein sogenanntes *Ereignisverwaltungssystem* (EVS), als weiteres Steuerungselement auf der zentralen Ebene, ergänzt, welches in der Lage ist, auftrags- und produktspezifische Ereignisinformationen unmittelbar zu verarbeiten und dem Steuerungsassistenzsystem zur situationsbasierten Entscheidungsfindung in Echtzeit bereitzustellen.

Auf der dezentralen Ebene der Referenzarchitektur werden als Steuerungselemente der SAS-Mitarbeiterdialog und das intelligente Produkt eingeführt. Der *SAS-Mitarbeiterdialog* stellt eine dezentrale Anwendung des Steuerungssystemassistentensystems dar, die lokale Steuerungsentscheidungen (z. B. Reihenfolgebildung oder Umplanung auf ein redundantes Arbeitssystem) durch die Verantwortlichen im Produktionsmodul erlaubt, ohne dabei mit der globalen Zielsetzung zu konkurrieren. Das *intelligente Produkt* bezeichnet die mit einem RFID-Transponder ausgestatteten Produktkomponenten, die sich am Ein- und Ausgang jedes Produktionsmoduls eindeutig identifizieren lassen und gleichzeitig in der Lage sind, steuerungsrelevante Informationen dezentral zu speichern und diese zur Berücksichtigung in dezentralen Steuerungsentscheidungen bereitzustellen.

Die Referenzarchitektur beschreibt die für eine situationsbasierte Produktionssteuerung notwendigen Steuerungselemente und deren Organisationsstruktur. Darüber hinaus werden in diesem Rahmen die zugrunde liegenden steuerungsrelevanten *Daten und Datenstrukturen* definiert. Dabei werden insbesondere alle Informationen, die auf dem intelligenten Produkt zu speichern sind, detailliert sowie die auftrags- und produktspezifischen Ereignisdaten eingeführt, um den Produktzustand und den Auftragsstatus beschreiben zu können.

7.2 Referenzarchitektur

7.2.1 Allgemeines

Das Ziel der vorliegenden Referenzarchitektur ist die allgemeingültige Beschreibung der zu einem RFID-basierten hybriden Informationsmanagement gehörigen Steuerungselemente sowie deren Organisation, Schnittstellen, Daten und Datenstrukturen. Die Referenzarchitektur beschreibt somit die informationstechnische Grundlage zur Umsetzung der im Rahmen des vorliegenden Systems entwickelten situationsbasierten Steuerungsverfahren. Sie soll dabei einen Vorlagencharakter haben und kann somit als ein Referenzmodell zur Organisation und Strukturierung von Steuerungselementen verstanden werden. „*Ein Referenzmodell ist ein [...] Modell, das allgemeingültigen Charakter haben soll. Es dient als Ausgangslösung zur Entwicklung unternehmensspezifischer Modelle*“ (KRCMAR 2005, S. 107). Nach KLINGER & WENZEL (2000) weisen Referenzmodelle im Allgemeinen die nachfolgenden Eigenschaften und Anforderungen auf, die im Speziellen seitens der Referenzarchitektur erfüllt sein sollen:

- Allgemeingültigkeit und leichte Verständlichkeit
- Vorlagencharakter und modularer Aufbau
- Anpassbarkeit und Wiederverwendbarkeit
- Unabhängigkeit von der Implementierungsform

Die Allgemeingültigkeit und der Vorlagencharakter der Referenzarchitektur sollen dadurch sichergestellt werden, dass bei der Spezifizierung der einzelnen Steuerungselemente und Datenstrukturen möglichst starker Bezug auf bestehende und in der Praxis anerkannte Definitionen, Richtlinien und Standards genommen wird. Hierdurch kann gleichzeitig die Akzeptanz und die Verständlichkeit der Architektur und damit des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements gesteigert werden. Die Steuerungselemente der Referenzarchitektur können als deren Module verstanden werden, die eindeutige organisatorische Beziehungen und Schnittstellen zueinander aufweisen, wodurch ein modularer Aufbau der Architektur inhärent gegeben ist. Die Spezifikation der Referenzarchitektur erfolgt ausschließlich aufgabenorientiert unter Vorstellung etwaiger Umsetzungsmöglichkeiten. Vorgaben zur genauen Art und Form der Implementierung werden nicht vorgenommen, was deren Unabhängigkeit gewährleistet und dem Anwender jederzeit die Möglichkeit zur Anpassung, Wiederverwendung und Weiterentwicklung bietet.

In den nachfolgenden Abschnitten werden die zentralen und dezentralen Steuerungselemente der Referenzarchitektur mit ihren Eigenschaften und Abhängigkeiten detailliert vorgestellt und die steuerungsrelevanten Daten und Datenstrukturen eingeführt. Zum besseren Verständnis der Schnittstellen und der Interaktion der Steuerungselemente der Referenzarchitektur untereinander, erfolgt in Abbildung 27 eine Einordnung dieser auf der zentralen und dezentralen Steuerungsebene in einem Unternehmen. Ergänzend wird auf der Planungsebene allgemein das *Planungssystem* eingeführt, welches der Produktionssteuerung wesentliche Plan- und Zielvorgaben erteilt.

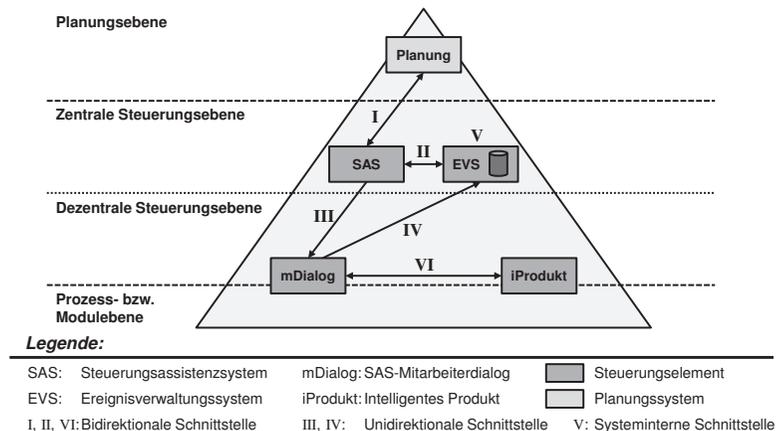


Abbildung 27: Interaktion und Schnittstellen der Steuerungselemente

7.2.2 Zentrale Steuerungselemente

7.2.2.1 Steuerungsassistenzsystem

Spezifikation

Wie in Abbildung 27 dargestellt, handelt es sich bei dem Steuerungsassistenzsystem um ein zentrales Steuerungselement, welches demnach auf der zentralen Steuerungsebene anzuordnen ist. Die Spezifikation des Steuerungsassistenzsystems erfolgt aufgabenorientiert in Anlehnung an die VDI-RICHTLINIE 5600 (2007) für Fertigungsmanagementsysteme und damit unabhängig von der Implementierungsform, was den Anforderungen einer Referenzarchitektur genügt. Die Aufgaben dieses Steuerungselements fokussieren dabei rein auf die situationsbasierte Produktionssteuerung und umfassen somit nicht den vollständigen Aufgabenumfang eines MES. Folglich ist das Steuerungsassistenzsystem von einem solchen System (vgl. Abschnitt 2.4.2) zu unterscheiden, wenngleich die softwaretechnische Umsetzung der SAS-Aufgaben durch ein MES realisiert werden kann.

Aufgaben

Zur Realisierung einer situationsbasierten Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage werden seitens des Steuerungsassistenzsystems Aufgaben übernommen, die sich in drei Aufgabenbereiche untergliedern lassen (vgl. Abbildung 28).



Legende:

SAS: Steuerungsassistenzsystem Steuerungselement Aufgabenbereich

Abbildung 28: Aufgabenbereiche des SAS

Kern des ersten Aufgabenbereiches stellen die softwaretechnische Abbildung und die Ausführung der *zentralen situationsbasierten Produktionssteuerungsverfahren* dar. Hierzu zählen die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe sowie die intermodulare Schlupfzeitverteilung (vgl. Abschnitt 5.2). Das Steuerungsassistenzsystem verfügt durch die Schnittstellen zu anderen relevanten Steuerungselementen über eine stets aktuelle Informationsbasis, die eine situationsbasierte Ausführung der Steuerungsverfahren ermöglicht und sicherstellt.

Die *betriebsparallele Leistungsanalyse* beschreibt den Aufgabenbereich, der für die Berechnung von steuerungsrelevanten Kennzahlen verantwortlich ist. Neben der für die intermodulare Schlupfzeitverteilung erforderlichen Modulertermintreue

und auftragsspezifischen mittleren Durchlaufzeit, kann zudem der mittlere Umlaufbestand und der aktuelle Auftragsrückstand modulspezifisch und kontinuierlich berechnet werden. Letzterer stellt die wesentliche Datenbasis für die intramodulare Rückstandsregelung dar. Die auftragsspezifische mittlere Durchlaufzeit wird außerdem zur Berechnung der modulbezogenen Plan-Starttermine und Plan-Endtermine eines Produktionsauftrags verwendet, was mit Hilfe der, beispielsweise in LÖDDING (2008) beschriebenen, Vorwärts- und Rückwärtsterminierung erfolgt. Außerdem wird diese Kennzahl zur regelmäßigen Aktualisierung der Produkt-Arbeitssystem-Matrix (vgl. Abschnitt 6.2.2) genutzt, die für die steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung eingesetzt wird. Sofern es sich um einen Neuauftrag handelt und keine erfassten Durchlaufzeiten zur Verfügung stehen, werden durch die Produktionsplanung entsprechende Planwerte bereitgestellt, um die modulbezogenen Plan-Termine zu berechnen (vgl. Abschnitt 6.4.2).

Unter der *Echtzeit-Auftragsüberwachung* wird der Aufgabenbereich verstanden, der den Auftragsstatus eines Produktionsauftrags von der Freigabe bis zur Fertigstellung kontinuierlich überwacht. Sofern ein Produktionsauftrag ein Los mit mehr als einem herzustellenden Produkt (Losgröße > 1) umfasst, so wird der aktuelle Auftragsstatus durch den zuletzt ausgeführten Arbeitsvorgang desjenigen Produktes, welches den geringsten Bearbeitungsfortschritt aufweist, beschrieben. Mittels der stets aktuellen Datenbasis verfügt das Steuerungsassistenzsystem über eine hinreichende Informationsgrundlage, um einen regelmäßigen Abgleich von Plan- und Ist-Informationen durchzuführen und im Falle von kritischen Abweichungen etwaige Gegenmaßnahmen zur Minimierung möglicher Konsequenzen einzuleiten. Darüber hinaus erfolgt eine betriebsparallele Dokumentation der auftrags- und produktspezifischen Produktionsabläufe, wodurch eine Verfolgung und Rückverfolgung (Tracking & Tracing) effizient ermöglicht werden.

Schnittstellen

Das Steuerungsassistenzsystem erhält zur Erfüllung seiner wesentlichen Aufgaben jegliche Planvorgaben von einem Planungssystem (z. B. ERP-System) über eine bidirektionale Schnittstelle (I, vgl. Abbildung 27) in für die Produktionsplanung üblichen Zeitintervallen (Schichten bis mehrere Tage). Hierzu zählen neben den prozessspezifischen Informationen der Arbeitsvorbereitung (z. B. Arbeitspläne, relevante Arbeitssysteme, auftragsspezifische Rüstumfänge und -zeiten) vor allem die Ergebnisse der Feinplanung. Für die situationsbasierte Produktionssteuerung sind jedoch keine feinterminierenden Maschinenbelegungspläne erforderlich, sondern lediglich die Plan-Starttermine und Plan-Endtermine der Produktionsaufträge. Die Berechnung der modulbezogenen Termine erfolgt durch das Steuerungsassistenzsystem unter Verwendung von Daten, die mittels der betriebsparallelen Leistungsanalyse bereitgestellt werden. Die Fertigstellung

eines Auftrags wird vom Steuerungsassistenzsystem regelmäßig und unmittelbar an das Planungssystem kommuniziert.

Ebenfalls auf der zentralen Steuerungsebene angeordnet ist das Ereignisverwaltungssystem (EVS), welches das Steuerungsassistenzsystem mit auftrags- und produktspezifischen Ereignisdaten aus der laufenden Produktion kontinuierlich und in Echtzeit versorgt, was somit die informatorische Grundlage für situationsbasierte Steuerungsentscheidungen schafft. Die Spezifikation dieser bidirektionalen Schnittstelle (II, vgl. Abbildung 27) erfolgt im Zuge der Detaillierung des Ereignisverwaltungssystems (vgl. Abschnitt 7.2.2.2).

Auf der dezentralen Steuerungsebene verfügt das Steuerungsassistenzsystem über einen SAS-Mitarbeiterdialog (vgl. Abschnitt 7.2.3.1), der Steuerungsentscheidungen dezentral im Produktionsmodul und somit Ad-hoc-Maßnahmen zur Selbstoptimierung erlaubt. Hierbei werden vom Steuerungsassistenzsystem im Wesentlichen auftragspezifische und für die dezentralen situationsbasierten Steuerungsverfahren relevante Informationen (z. B. Auftragsvorrat, Auftragsrückstand, modulspezifische Schlupfzeit, auftragspezifische Rüstzeit) an den SAS-Mitarbeiterdialog kommuniziert. Der Beginn oder der Abschluss eines Auftrags in einem Produktionsmodul wird dem Steuerungsassistenzsystem ereignisbasiert über das Ereignisverwaltungssystem und nicht über den SAS-Mitarbeiterdialog kommuniziert, weshalb diese Schnittstelle (III, vgl. Abbildung 27) als unidirektional zu bezeichnen ist.

7.2.2.2 Ereignisverwaltungssystem

Spezifikation

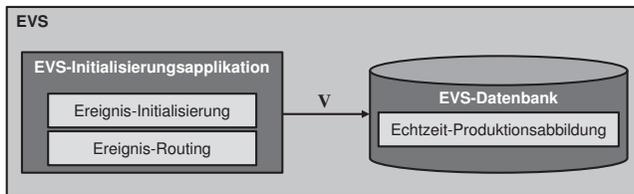
Das Ereignisverwaltungssystem ist gemäß Abbildung 27 ebenfalls auf der zentralen Steuerungsebene der Referenzarchitektur angeordnet und kann als Informationsmodul des Steuerungsassistenzsystems für situationsbasierte Steuerungsentscheidungen verstanden werden. Es besteht aus den beiden Subsystemen EVS-Datenbank und EVS-Initialisierungsapplikation. Die Datenbank repräsentiert dabei ein permanentes Abbild der aktuellen auftragsbezogenen Produktionssituation durch die Speicherung und Bereitstellung von jeglichen produktspezifischen Ereignissen (vgl. Abschnitt 7.2.4). Ergänzend ist die Initialisierungsapplikation für die Echtzeit-Initialisierung und -Weiterleitung der Ereignisdaten an die Datenbank, die im Zuge der RFID-basierten Identifikation von Produkten an jedem Produktionsmoduleingang und -ausgang generiert werden, zuständig.

Um den Anforderungen nach Allgemeingültigkeit und Vorlagencharakter der Referenzarchitektur gerecht zu werden, orientiert sich die Entwicklung und Umsetzung des Ereignisverwaltungssystems mit der EVS-Datenbank, der EVS-Initialisierungsapplikation sowie den jeweiligen Schnittstellen an den Empfeh-

lungen des EPC Information Services (EPCIS), die im Rahmen des GS1-STANDARD (2007) beschrieben sind.

Aufgaben

Um seitens des Steuerungsassistenzsystems situationsbasierte Steuerungsentscheidungen treffen zu können, leistet das Ereignisverwaltungssystem mit seinen beiden Subsystemen einen erheblichen Beitrag bezüglich der für die zentralen Steuerungsverfahren notwendigen Echtzeit-Datengrundlage. Die zu erfüllenden Aufgaben können dabei in die folgenden Bereiche eingeteilt werden (vgl. Abbildung 29).



Legende:

EVS: Ereignisverwaltungssystem Steuerungselement Aufgabenbereich
 V: Systeminterne, unidirektionale Schnittstelle Subsysteme

Abbildung 29: Subsysteme und Aufgabenbereiche des EVS

Im Rahmen der *Ereignis-Initialisierung* strukturiert die EVS-Initialisierungsapplikation die RFID-basiert generierten und vom SAS-Mitarbeiterdialog weitergeleiteten Erfassungsdaten betriebsparallel zu produktspezifischen Ereignissen, die der in Abschnitt 7.2.4 eingeführten Datenstruktur genügen. Dabei werden die Erfassungsdaten (Identifikationsnummer des Produktes, Ereigniszeitpunkt etc.) um weitere steuerungsrelevante Informationen ergänzt. Hierzu zählen produktspezifische Qualitätsdaten, die während der Bearbeitung im Zuge der Qualitätssicherung erhoben wurden. In diesem Zusammenhang kann auch der Produktstatus zentral im Ereignisverwaltungssystem zwischen i. O. (in Ordnung) und n. i. O. (nicht in Ordnung) verändert werden, um beispielsweise weitere für diesen Auftrag relevante Arbeitsschritte solange aufzuhalten, bis eine entsprechende Nacharbeit erfolgt ist. Darüber hinaus wird in dem produktspezifischen Ereignis der zuletzt ausgeführte Arbeitsvorgang als Bearbeitungsfortschritt gespeichert, um den aktuellen Auftragsstatus daraus ableiten zu können.

Eine weitere Aufgabe des Ereignisverwaltungssystems und im Speziellen der EVS-Initialisierungsapplikation wird durch das *Ereignis-Routing* beschrieben. Hierbei wird sichergestellt, dass ein produktspezifisches Ereignis nach der Initialisierung dem Steuerungsassistenzsystem in Abhängigkeit des situationsbasierten Steuerungsverfahrens direkt weitergeleitet wird (Push-Modus) oder für spätere Anfragen in der EVS-Datenbank zur Verfügung steht (Pull-Modus).

Das Subsystem EVS-Datenbank speichert die in der laufenden Produktion generierten und kontinuierlich erfassten produktspezifischen Ereignisse in einer Datenbank und schafft damit ein *Echtzeit-Abbild der aktuellen Produktionssituation* hinsichtlich der freigegebenen Produktionsaufträge. Das Steuerungsassistenzsystem verfügt mit der EVS-Datenbank über eine stets aktuelle Informationsgrundlage, auf die bei der Ausführung der situationsbasierten Produktionssteuerungsverfahren zugegriffen wird, um deren Situationsbezogenheit zu garantieren.

Schnittstellen

Zwischen dem SAS-Mitarbeiterdialog, der in diesem Zusammenhang als Middleware bzw. Applikationssoftware des RFID-Systems agiert (vgl. Abschnitt 2.4.3), und dem Ereignisverwaltungssystem wird eine unidirektionale Schnittstelle (IV, vgl. Abbildung 27) definiert, über die sämtliche Erfassungsdaten unmittelbar auf die zentrale Steuerungsebene weitergeleitet werden und damit die Initialisierungsapplikation aufgerufen wird. Eine Sammlung und Auswertung von Erfassungsdaten auf der dezentralen Steuerungsebene ist nicht vorgesehen. Zu diesen Erfassungsdaten zählen im Wesentlichen die Identifikationsnummer (Produkt-ID), der Erfassungszeitpunkt und -ort sowie der Grund einer RFID-basierten Produktidentifikation (Bearbeitungsbeginn oder -ende am Produktionsmodul). Darüber hinaus erfolgen die Kommunikation der Ergebnisse (z. B. Produktstatus) aus einer etwaigen Qualitätssicherung sowie der zuletzt ausgeführte Arbeitsvorgang als Bearbeitungsfortschritt für die Abfrage des aktuellen Auftragsstatus.

Die beiden Subsysteme des Ereignisverwaltungssystems interagieren über eine systeminterne unidirektionale Schnittstelle (V, vgl. Abbildung 27 und Abbildung 29), die die Weiterleitung der Ereignisse von der EVS-Initialisierungsapplikation zur EVS-Datenbank in Echtzeit erlaubt. Hierdurch wird sichergestellt, dass die Datenbank stets ein aktuelles Abbild der sich in der Produktion befindlichen Aufträge repräsentiert und die Initialisierungsapplikation ausschließlich ihren Aufgaben Initialisierung und Routing nachkommen kann.

Wie bereits bei den Aufgaben des Ereignisverwaltungssystems benannt, kann die Interaktion zum Steuerungsassistenzsystem auf zwei Arten erfolgen: über den Push- und über den Pull-Modus. Diese Funktionalität muss mit Hilfe einer bidirektionalen Schnittstelle (II, vgl. Abbildung 27) zwischen den beiden zentralen Steuerungselementen umgesetzt werden. Der Push-Modus ist für die situationsbasierten Reihenfolgebildungsverfahren, die intermodulare Schlupfzeitverteilung sowie die intramodulare Rückstandsregelung notwendig. Für das zentrale situationsbasierte Steuerungsverfahren synchrone zweistufige Auftragsfreigabe ist der Push-Modus ebenfalls erforderlich, bei der die Verfahrensausführung auf der zweiten Freigabestufe durch ein produktspezifisches Ereignis unmittelbar ausgelöst wird. Die erste Freigabestufe kann in Abhängigkeit der gewählten Verfah-

rennspezifikation nach dem Push- oder nach dem Pull-Modus erfolgen. Beim Pull-Modus fordert das Steuerungsassistenzsystem relevante Ereignisse beim Ereignisverwaltungssystem an und bekommt diese ad hoc von der EVS-Datenbank zur Verfügung gestellt.

7.2.3 Dezentrale Steuerungselemente

7.2.3.1 SAS-Mitarbeiterdialog

Spezifikation

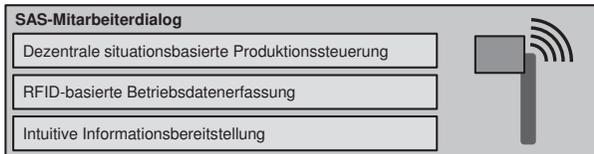
Wie Abbildung 27 verdeutlicht, handelt es sich bei dem SAS-Mitarbeiterdialog um ein dezentrales Steuerungselement in der Referenzarchitektur des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements, welches in jedem Produktionsmodul mit mindestens einer Instanz zur Verfügung steht. Der SAS-Mitarbeiterdialog kann als dezentrale Systemkomponente des Steuerungsassistenzsystems verstanden werden, das lokale Steuerungsentscheidungen auf Modulebene ermöglicht. Durch die Schnittstelle zum Steuerungsassistenzsystem, welches die globalen logistischen Ziele vorgibt, wird ein unvorhersehbares Verhalten der Produktionsabläufe verhindert, da die dezentralen Steuerungsentscheidungen ausschließlich in einem vorgegebenen Rahmen (z. B. definierte Terminschranken) erfolgen können.

Der SAS-Mitarbeiterdialog ist das Steuerungssystem zur Ausführung der dezentralen situationsbasierten Steuerungsverfahren auf Modulebene, welches hierzu sämtliche Steuerungs- und Informationsflüsse innerhalb eines Produktionsmoduls ausführt und koordiniert. Es erfolgt ein regelmäßiger Informationsaustausch mit der zentralen Steuerungsebene, sowohl mit dem Steuerungsassistenzsystem als auch mit dem Ereignisverwaltungssystem. Mit Hilfe der in dieses Steuerungselement integrierten RFID-Technologie ist der SAS-Mitarbeiterdialog in der Lage, mit intelligenten Produkten, welche direkt auf der Prozessebene agieren, zu kommunizieren.

Die Entwicklung des SAS-Mitarbeiterdialogs hinsichtlich der Abbildung der dezentralen situationsbasierten Steuerungsverfahren sowie der Bereitstellung steuerungsrelevanter Informationen erfolgt dabei, analog dem Steuerungsassistenzsystem, aufgabenorientiert gemäß der VDI-RICHTLINIE 5600 (2007). Die RFID-basierte Erfassung von auftrags- und produktspezifischen Daten sowie deren Verdichtung und Weiterleitung an das Ereignisverwaltungssystem muss wiederum dem GS1-STANDARD (2007) genügen, was insbesondere für die Umsetzung der Middleware bzw. Applikationssoftware sowie der notwendigen Schnittstellen zum Ereignisverwaltungssystem und zum intelligenten Produkt relevant ist.

Aufgaben

Um eine situationsbasierte Produktionssteuerung zu ermöglichen, muss der SAS-Mitarbeiterdialog als dezentrales Steuerungselement im Produktionsmodul die folgenden Aufgabenbereiche erfüllen (vgl. Abbildung 30).



Legende:

 Steuerungselement  Aufgabenbereich  SAS-Mitarbeiterdialog (Darstellungsbeispiel)

Abbildung 30: Aufgabenbereiche des SAS-Mitarbeiterdialogs

Die *dezentrale situationsbasierte Produktionssteuerung* verfolgt das Ziel, die *dezentralen Steuerungsverfahren* einerseits softwaretechnisch abzubilden und andererseits deren situationsbasierte Ausführung mit Hilfe des SAS-Mitarbeiterdialogs zu ermöglichen. Zu den relevanten Steuerungsverfahren zählen die terminorientierte und die rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung sowie die intramodulare Rückstandsregelung. Durch die Möglichkeit des SAS-Mitarbeiterdialogs zur RFID-basierten Kommunikation mit dem intelligenten Produkt und der kontinuierlichen Bereitstellung steuerungsrelevanter Informationen (z. B. aktueller Auftragsrückstand) durch das Steuerungsassistenzsystem, wird die informationstechnische Basis zur Ausführung der genannten Steuerungsverfahren geschaffen.

Durch die Integration der für ein RFID-System notwendigen Hardwarekomponenten und deren softwaretechnische Einbettung in den SAS-Mitarbeiterdialog, der hierzu als Middleware bzw. Applikationssoftware agiert, wird eine *RFID-basierte Betriebsdatenerfassung* ermöglicht. Es handelt sich dabei um eine Online-Betriebsdatenerfassung, bei der ein intelligentes Produkt beim Eintreffen im Produktionsmodul automatisch und betriebsparallel identifiziert wird und die dezentral auf dem RFID-Transponder gespeicherten steuerungsrelevanten Daten ausgelesen werden. Nach Abschluss aller modulspezifischen Arbeitsvorgänge wird dieses Produkt erneut erfasst und die Transponderdaten für den weiteren Produktionsablauf aktualisiert. Hierbei werden insbesondere alle durchgeführten Arbeitsvorgänge im SAS-Mitarbeiterdialog bestätigt und dezentral, gemäß der in Abschnitt 7.2.4 definierten Datenstruktur, auf dem intelligenten Produkt gespeichert. Je nach betriebsorganisatorischer Gestaltung des Produktionsmoduls kann es sinnvoll sein, dass ein modulspezifischer SAS-Mitarbeiterdialog über mehrere Instanzen verfügt, die an ausgewählten Arbeitssystemen angebracht werden. Ebenfalls zur RFID-basierten Betriebsdatenerfassung zählen die Verdichtung und Weiterleitung aller auftrags- und produktspezifischen Daten an das Ereignisver-

waltungssystem, sowohl vor als auch nach der Bearbeitung eines intelligenten Produktes in einem Produktionsmodul. Hierzu zählen die Identifikationsnummer (Produkt-ID), der Erfassungszeitpunkt und -ort sowie der Identifikationsgrund. Zudem erfolgt die Kommunikation der Ergebnisse aus einer etwaigen Qualitätssicherung sowie des zuletzt ausgeführten Arbeitsvorgangs zur Bestimmung des aktuellen Auftragsstatus.

Mit der *intuitiven Informationsbereitstellung* wird den Modulverantwortlichen (z. B. Meister) die Möglichkeit zur dezentralen Selbstoptimierung, im Sinne einer gezielten Beeinflussung von Produktionsabläufen, geschaffen. Hierzu werden relevante Informationen (aktueller, sequenzierter Auftragsvorrat mit modulspezifischen Plan-Endterminen, redundante Arbeitssysteme für einen Arbeitsvorgang etc.) aufbereitet und über den SAS-Mitarbeiterdialog zur Verfügung gestellt. Dies erlaubt beispielsweise die Umplanung eines Produktionsauftrags auf ein redundantes Arbeitssystem im Produktionsmodul oder die Anpassung der systemseitig vorgeschlagenen Reihenfolgebildung in einem fest definierten logistischen Rahmen. Darüber hinaus können den Mitarbeitern mit Hilfe dieses Steuerungselements prozessspezifische Informationen, wie z. B. animierte Arbeitspläne oder Warnhinweise, bereitgestellt werden, um die Ausführung von Produktionsabläufen möglichst effizient, zielgerichtet und fehlerfrei zu gestalten. Dies motiviert die Implementierung weiterer Instanzen des SAS-Mitarbeiterdialogs an den Arbeitssystemen in einem Produktionsmodul.

Schnittstellen

Der SAS-Mitarbeiterdialog weist Schnittstellen zu den zentralen Steuerungselementen Steuerungsassistenzsystem (III, vgl. Abbildung 27) und Ereignisverwaltungssystem (IV, vgl. Abbildung 27) auf. Diese unidirektionalen Schnittstellen wurden bereits in den Abschnitten 7.2.2.1 und 7.2.2.2 ausführlich beschrieben und müssen an dieser Stelle nicht weiter spezifiziert werden.

Auf der dezentralen Steuerungsebene interagiert der SAS-Mitarbeiterdialog mit intelligenten Produkten unter Einsatz der RFID-Technologie. Gemäß Abschnitt 2.4.3 ist eine solche bidirektionale Schnittstelle als Luftschnittstelle (VI, vgl. Abbildung 27) zu bezeichnen und wird zwischen dem RFID-Transponder des intelligenten Produktes und dem zum SAS-Mitarbeiterdialog gehörigen Schreib-/Lesegerät aufgebaut. Über die Middleware bzw. Applikationssoftware wird dieses Schreib-/Lesegerät gesteuert. Die zurückgesendeten Daten (z. B. Produkt-ID) werden unmittelbar aufgenommen und für die Nutzung (z. B. Kommunikation an Ereignisverwaltungssystem) vorbereitet. Zudem erfolgt über diese Schnittstelle die Beschreibung des intelligenten Produktes mit steuerungsrelevanten Daten (z. B. Dokumentation der ausgeführten Arbeitsvorgänge) nach dessen Bearbeitung in einem Produktionsmodul.

7.2.3.2 Intelligentes Produkt

Spezifikation

Als weiteres Element auf der dezentralen Steuerungsebene der Referenzarchitektur wird an dieser Stelle das intelligente Produkt eingeführt. Aufgrund der vorteilhaften Eigenschaften der RFID-Technologie (vgl. Abschnitt 2.4.3) werden, aufbauend auf der Definition nach ZBIB et al. (2008), intelligente Produkte der Klasse 2 als dezentrale Steuerungselemente in die Referenzarchitektur integriert. Danach verfügt ein intelligentes Produkt über eine eindeutige Identifikationsnummer sowie über einen Datenspeicher, auf den lesend und schreibend zugegriffen werden kann und auf welchem steuerungsrelevante produktspezifische Nutzdaten abgelegt werden. Das informationstechnische Gegenstück zu dem RFID-Transponder des intelligenten Produktes bilden die Hard- und Softwarekomponenten des RFID-Systems, die dem Steuerungselement SAS-Mitarbeiterdialog zugeordnet sind (vgl. Abschnitt 7.2.3.1).

Die Initialisierung des RFID-Transponders und damit des intelligenten Produktes erfolgt im ersten Produktionsmodul unmittelbar nach der Auftragsfreigabe mit Hilfe von Daten, die von der Produktionsplanung bereitgestellt werden. Sofern an einem Produkt aus geometrischen oder fertigungstechnischen Gründen kein RFID-Transponder angebracht werden kann, muss eine eindeutige Verknüpfung dieses Produktes mit einem intelligenten Werkstückträger erfolgen, der auf seinem Transponder den vollständigen Datensatz des Produktes bereithält.

Das vorliegende RFID-basierte hybride Informationsmanagement setzt, gemäß den ausführlichen Darstellungen und Argumentationen in den Abschnitten 2.4.3, 4.2.3 und 4.4.3, auf ein intelligentes Produkt der Klasse 2. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass dessen nachfolgend beschriebene Aufgaben ganz oder teilweise auch von intelligenten Produkten einer anderen Klasse oder unter Einsatz des vorgestellten Data-on-Network-Ansatzes erfüllt werden könnten, was jedoch aus Steuerungs-, Prozess- und Effizienz-sicht nicht weiter verfolgt wird.

Aufgaben

Aufbauend auf den von HUANG et al. (2009), OSTGATHE (2012) und REINHART et al. (2013a) vorgestellten Nutzenkategorien RFID-gestützter, intelligenter Produkte (vgl. Abschnitt 4.2.3), lassen sich die beiden folgenden Aufgabenbereiche für das intelligente Produkt als dezentrales Steuerungselement der Referenzarchitektur benennen (vgl. Abbildung 31).

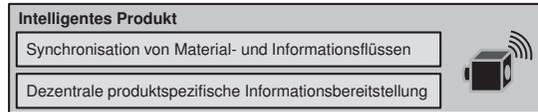
**Legende:**

Abbildung 31: Aufgabenbereiche des intelligenten Produktes

Die *Synchronisation von Material- und Informationsflüssen* verfolgt das Ziel, sämtliche Steuerungsentscheidungen auf Basis der physischen Präsenz eines intelligenten Produktes und dessen individuellen Bearbeitungsfortschritts anzustoßen. Hierzu ist das intelligente Produkt und dessen Produktionsauftrag eindeutig identifizierbar, was durch die in Abschnitt 7.2.4 eingeführten Daten und Datenstrukturen sichergestellt wird. Mit der Identifikation eines Produktes vor und nach der Bearbeitung in einem Produktionsmodul werden Produktionssteuerungsverfahren zur zielgerichteten Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung ad hoc ausgelöst. Das intelligente Produkt agiert somit aus dem Materialfluss heraus als Trigger, der den Impuls zur Entscheidungsfindung und für die damit verbundenen steuerungsrelevanten Informationsflüsse darstellt. Gleichzeitig schafft die regelmäßige Identifikation von Produkten während der individuellen Produktionsprozesse eine hohe Informationstransparenz hinsichtlich der aktuellen Situation freigegebener Produktionsaufträge und stellt damit die informationstechnische Grundlage der Aufgaben betriebsparallele Leistungsanalyse und Echtzeit-Auftragsüberwachung des Steuerungsassistenzsystems dar (vgl. Abschnitt 7.2.2.1).

Wie bereits zu Beginn dieses Abschnitts erläutert, ist das intelligente Produkt in der Lage, steuerungsrelevante *produktspezifische Informationen dezentral bereitzustellen*, die im Rahmen der situationsbasierten Steuerungsentscheidungen berücksichtigt werden müssen. Gemäß der in Abschnitt 7.2.4 eingeführten Daten und Datenstruktur umfassen diese sowohl organisatorische (z. B. Produkt-ID, Auftragsnummer, Plan-Endtermin) als auch prozessuale (z. B. Bearbeitungsfortschritt, Qualitätsdaten) Informationen. Der wesentliche Vorteil dieser dezentralen Datenhaltung ist, dass bestimmte steuerungsrelevante Daten nur direkt auf dem RFID-Transponder gespeichert sind und durch das intelligente Produkt echtzeitnah selbst bereitgestellt werden können. Damit werden die Schnittstellen zwischen den verschiedenen zentralen und dezentralen Steuerungselementen der Referenzarchitektur entlastet. Zudem wird das gesamte Informationsmanagement, gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.3, durch die Dezentralisierung robuster und steuerungsrelevante Daten sind schneller vor Ort verfügbar, da im Rahmen der hybriden Datenhaltung schnelle Antwortzeiten zu erwarten sind (vgl. Abschnitt 4.4.3). Die Daten werden, gemäß den Empfehlungen in Abschnitt 4.4.4, in Abhängigkeit des zu speichernden Datenvolumens auf dem RFID-Transponder des intelligenten Produktes strukturiert abgelegt. Sofern die zu

speichernden Daten eine Größe von ca. 300 Byte nicht überschreiten, werden die Daten sequentiell und gemäß dem GS1-STANDARD 2011 unter Einsatz der accessMethod noDirectory auf dem Transponder gespeichert. Sofern größere Datenmengen, wie beispielsweise Prozess- und Qualitätsdaten (vgl. Abschnitt 7.2.4.3), auf dem intelligenten Produkt abgelegt werden müssen, erfolgt die Verwendung eines effizienteren Datenformats (z. B. SemProM-Datenformat, vgl. Abschnitt 4.4.4), das einen wahlfreien Zugriff auf den Datenspeicher zulässt.

Schnittstellen

Das Steuerungselement intelligentes Produkt weist ausschließlich eine bidirektionale Schnittstelle auf der dezentralen Ebene zu dem SAS-Mitarbeiterdialog auf, welche als Luftschnittstelle (VI, vgl. Abbildung 27) bezeichnet wird und im Rahmen von Abschnitt 7.2.3.1 bereits ausführlich beschrieben wurde.

7.2.4 Daten und Datenstrukturen

7.2.4.1 Einführung

Neben der Beschreibung der zentralen und dezentralen Steuerungselemente, werden im Rahmen der Referenzarchitektur für ein RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement im vorliegenden Abschnitt die Daten und Datenstrukturen definiert, die notwendig sind, um eine situationsbasierte Produktionssteuerung zu ermöglichen. Dabei stehen das *produktspezifische Ereignis* zur Abbildung des aktuellen *Auftragsstatus* und die *produktspezifischen Transponderdaten* zur Abbildung des aktuellen *Produktzustands* im Fokus. Diese Daten und Datenstrukturen unterscheiden sich wesentlich von den in konventionellen PPS-Systemen abgebildeten Daten und erlauben die im Rahmen dieser Arbeit adressierten Ad-hoc-Informationsflüsse. Sowohl die Ereignisse als auch die Transponderdaten ergänzen die bereits bestehenden Informationen somit zu einer stets aktuellen Datenbasis, auf die bei der Ausführung der situationsbasierten Produktionssteuerung in Echtzeit zugegriffen wird und wodurch deren Situationsbezogenheit garantiert wird.

7.2.4.2 Abbildung des Auftragsstatus

Der Status eines Produktionsauftrags wird durch den zuletzt ausgeführten Arbeitsvorgang desjenigen zum Auftragslos zählenden Produktes bestimmt, welches, unter Berücksichtigung der noch ausstehenden Durchführungs- und Übergangszeiten, den geringsten Bearbeitungsfortschritt aufweist. Der aktuelle Auftragsstatus lässt sich somit mittels der Auswertung produktspezifischer Ereignisse abbilden. Ein Ereignis wird dabei als produktspezifisch bezeichnet, da es von einem individuellen Produkt während dessen Produktionsablauf generiert wird.

Die in einem solchen Ereignis zusammengefassten Ereignisinformationen beinhalten sowohl auftragspezifische (z. B. Auftragsnummer) als auch produktspezifische (z. B. Produktstatus) Daten. Ein produktspezifisches Ereignis referenziert zunächst auf die Produktkomponenten bzw. die Einzelteile eines Auftrags, auch wenn diese später zu einem Produkt montiert werden sollten. Das Ereignisverwaltungssystem überführt die generierten Ereignisinformationen in die geforderte Ereignis-Datenstruktur und stellt diese für situationsbasierte Steuerungsentscheidungen zur Verfügung. Die Ableitung des aktuellen Auftragsstatus aus den gespeicherten Ereignissen erfolgt darauf aufbauend durch das Steuerungsassistenzsystem (vgl. Abschnitte 7.2.2.1 und 7.2.2.2).

Wie in Abschnitt 4.4.2 dargestellt, umfasst ein EPCIS-Event nach den Vorgaben des EPC Information Services, die im Rahmen des GS1-STANDARD (2007) beschrieben sind, ausschließlich organisatorische Produktinformationen. Die Speicherung von prozessualen produktspezifischen Informationen (z. B. Qualitätsdaten), was seitens der situationsbasierten Produktionssteuerung erforderlich ist, ist gemäß diesem Standard nicht vorgesehen. Deshalb lehnt sich die vorliegende Ereignis-Datenstruktur zwar an die Vorgaben des EPCIS an, geht jedoch hinsichtlich der formulierten Anforderungen an das Produktionssteuerungssystem über diese hinaus: Ein produktspezifisches Ereignis, wie es im Rahmen dieser Arbeit vorgestellt wird, fasst bei der Identifikation eines intelligenten Produktes (Was?) auftrags- und produktspezifische Informationen über deren Zeitpunkt (Wann?), Ort (Wo?) und Grund (Warum?) sowie steuerungsrelevante Produktionsergebnisse (Wie?) in der Ereignis-Datenstruktur zusammen.

Zur Referenzierung auf das identifizierte Produkt (Was?) und den relevanten Auftrag erfolgt die Speicherung der eindeutigen *Produkt-ID* (z. B. Electronic Product Code (EPC), vgl. Abschnitt 4.4.3) und *Auftragsnummer* in der Ereignis-Datenstruktur. Die Auftragsnummer fasst die Produkte eines Auftragsloses zusammen, wodurch sich der aktuelle Auftragsstatus, wie zu Beginn des Abschnitts dargestellt, aus dem produktindividuellen Bearbeitungsfortschritt ermitteln lässt.

Der *Ereigniszeitpunkt* (Wann?) einer spezifischen Produktidentifikation wird mit Hilfe eines Zeitstempels angegeben, der das aktuelle Datum und die Uhrzeit in einer zeitzonunenunabhängigen Form speichert. Hierzu erfolgt eine Orientierung an der DIN ISO 8601 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 2006).

Zur Bestimmung des Ortes (Wo?) einer Produktidentifikation und damit des aktuellen Aufenthaltsortes eines Produktes wird dem Ereignis der *Identifikationspunkt* sowie die *Produktionsmodul-ID*, in welchem die Identifikation stattfindet, hinzugefügt. Gemäß GS1-STANDARD (2007) sollte dies mittels der Read-PointID und der BusinessLocationID erfolgen. Der Identifikationspunkt gibt einen exakt spezifizierten Ort an, an welchem die RFID-basierte Produkterfassung stattgefunden hat und referenziert dabei auf ein stationär installiertes

7 RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement

Schreib-/Lesegerät. Beim Einsatz eines mobilen Gerätes erfolgt die Ortsbestimmung über vorheriges Erfassen einer Ortsmarkierung. Über die Produktionsmodul-ID kann das Produktionsmodul abgeleitet werden, in welchem sich das identifizierte Produkt befindet. Dieser Aufenthaltsort bleibt aktuell, bis das Ereignis durch ein nächstes Ereignis mit neuer Produktionsmodul-ID abgelöst wird.

Der Grund (Warum?) einer Produktidentifikation kann durch zwei weitere Daten in der Ereignis-Datenstruktur gespeichert werden. Zum einen gibt der *Identifikationsgrund* als boolescher Ausdruck an, ob es sich um den Beginn (1) oder das Ende (0) der Bearbeitung eines Produktes in diesem Produktionsmodul handelt. Sofern zwischen Bearbeitungsbeginn und -ende weitere Produktidentifikationen erfolgen (vgl. Abschnitt 7.2.3.1), wird bei diesen Identifikationen stets der Bearbeitungsbeginn in dem Ereignis abgelegt. Der *Bearbeitungsfortschritt* gibt als Ergänzung hierzu den zuletzt ausgeführten Arbeitsvorgang des identifizierten Produktes an, womit sich der aktuelle Auftragsstatus bestimmen lässt. Dieser sollte gemäß GS1-STANDARD (2007) als BusinessStepID formuliert werden.

Für die Steuerungsverfahren der situationsbasierten Produktionssteuerung ist es, wie bereits beschrieben, wichtig, dass in der Ereignis-Datenstruktur produktspezifische Produktionsergebnisse (Wie?) gespeichert werden können. Hierzu werden, orientiert an der DIN 53804 (Teil 1 bis Teil 4), qualitative und quantitative Qualitätsmerkmale festgelegt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 1982, 1985a, 1985b, 2007). Neben dem booleschen *Produktstatus* (i. O., n. i. O.) als qualitativ-nominales Merkmal, werden in Abhängigkeit eines individuellen Produktes quantitative *Qualitätsmerkmale* in der Ereignis-Datenstruktur berücksichtigt, die je nach Anwendungsfall sowohl stetig (z. B. Bohrungsdurchmesser) als auch diskret (z. B. Anzahl Bohrungen) sein können.

Abbildung 32 stellt die Ereignis-Daten zur Bestimmung des aktuellen Auftragsstatus und die Datenstruktur übersichtlich dar.

Produktspezifisches Ereignis	
Was?	Produkt-ID Auftragsnummer
Wann?	Ereigniszeitpunkt
Wo?	Identifikationspunkt Produktionsmodul-ID
Warum?	Identifikationsgrund Bearbeitungsfortschritt
Wie?	Produktstatus Qualitätsmerkmale

Abbildung 32: Daten und Datenstruktur zur Abbildung des Auftragsstatus

7.2.4.3 Abbildung des Produktzustands

Bei der Ausführung der situationsbasierten Steuerungsverfahren mit Hilfe des RFID-basierten Informationsmanagements sollen produktspezifische Informationen berücksichtigt werden, die den aktuellen Zustand eines herzustellenden, intelligenten Produktes beschreiben. Diese steuerungsrelevanten Produktinformationen lassen sich in Anlehnung an die DIN 6789-2 definieren (vgl. Abschnitt 4.4.2) und in *organisatorische* und *prozessuale* produktspezifische Informationen auf dem RFID-Transponder strukturieren und speichern (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 1990, REINHART et al. 2013a). Der durch diese Produkt-Datenstruktur beschriebene Produktzustand bezieht sich dabei, analog dem produktspezifischen Ereignis, zunächst auf die Produktkomponenten bzw. die Einzelteile eines Auftrags, die nach dem Abschluss der notwendigen Bearbeitungsschritte (z. B. zerspanende Fertigung) evtl. zu einem Produkt montiert werden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass nicht alle Daten, die auf dem RFID-Transponder gespeichert werden, unmittelbar in einem Steuerungsverfahren verwendet werden. Diese Daten sind jedoch notwendig, um ein möglichst vollständiges Abbild des Produktzustands zu gewährleisten.

Die organisatorischen produktspezifischen Informationen dieser Datenstruktur werden weiter in *auftragsbezogene* und *ablaufbezogene* Informationen kategorisiert, verändern sich während der laufenden Produktion in der Regel nicht und werden bei der Initialisierung des RFID-Transponders von der Produktionsplanung bereitgestellt. Zu den auftragsbezogenen Informationen zählen die bereits unter Abschnitt 7.2.4.2 beschriebenen Daten *Produkt-ID* und *Auftragsnummer*. Die ablaufbezogenen organisatorischen Informationen umfassen den *Plan-Starttermin* und den *Plan-Endtermin* des produktspezifischen Produktionsdurchlaufs sowie dessen nach dem Arbeitsplan vorzunehmenden *Arbeitsvorgänge*, sortiert nach dem jeweils verantwortlichen Produktionsmodul.

Unter den prozessualen produktspezifischen Informationen werden Daten zusammengefasst, die im Laufe der Produktion durch den SAS-Mitarbeiterdialog aktualisiert werden können und die direkten Einfluss auf den produktspezifischen Produktionsablauf haben. Hierzu zählen, analog der Ereignis-Datenstruktur, der aktuelle *Produktstatus* (i. O., n. i. O.) sowie der *Bearbeitungsfortschritt* (zuletzt ausgeführter Arbeitsvorgang) eines individuellen Produktes. Sofern es sich bei einer Produktkomponente um eine Nebenkomponeente eines zu montierenden Produktes (vgl. Abschnitt 6.4.2) handelt, gibt das Datum *Produktstruktur* die Produkt-ID der relevanten Hauptkomponente an. Im Falle einer Hauptkomponente werden über die Produktstruktur wiederum die Produkt-IDs der montagerelevanten Nebenkomponeenten zur Verfügung gestellt. Hierdurch kann die Montage falscher Produktkomponenten dezentral im Produktionsmodul verhindert und die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe durch einen Produkt-ID-Abgleich abgesichert werden. Darüber hinaus sieht die vorliegende Produkt-Datenstruktur die

dezentrale Speicherung und Bereitstellung von *Prozess- und Qualitätsdaten* vor, die zwar in keines der entwickelten situationsbasierten Steuerungsverfahren direkt eingebunden sind, aber zur produktbasierten Prozesssteuerung genutzt werden können.

Abbildung 33 stellt die Produkt-Datenstruktur zur Abbildung des Produktzustandes als produktspezifische Transponderdaten sowie die Datenstruktur übersichtlich dar.

Produktspezifische Transponderdaten	
Auftragsbezogene organisatorische Daten	Produkt-ID Auftragsnummer
Ablaufbezogene organisatorische Daten	Plan-Starttermin Plan-Endtermin Arbeitsvorgänge
Prozessuale Daten	Produktstatus Bearbeitungsfortschritt Produktstruktur Prozess- und Qualitätsdaten

Abbildung 33: Daten und Datenstruktur zur Abbildung des Produktzustands

7.3 Fazit

Das zweite Element RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement des Systems zur situationsbasierten Produktionssteuerung wurde im Rahmen des vorliegenden Kapitels im Sinne einer Referenzarchitektur erarbeitet und in Anlehnung an anerkannte Definitionen, Richtlinien und Standards detailliert beschrieben. Dabei wurden in einem ersten Schritt die zentralen Steuerungselemente Steuerungsassistenzsystem und Ereignisverwaltungssystem eingeführt, bevor diese auf der dezentralen Steuerungsebene um den SAS-Mitarbeiterdialog und das intelligente Produkt ergänzt wurden. Zur Gewährleistung einer stets aktuellen Informationsbasis wurden zum Abschluss die für eine situationsbasierte Produktionssteuerung relevanten Daten und Datenstrukturen definiert. Angelehnt an die zusammenfassenden Nutzenkategorien (vgl. Abschnitt 4.2.3), ergeben sich mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements erhebliche Potenziale zur Schaffung einer situationsbasierten Produktionssteuerung. Mit Hilfe intelligenter Produkte können geschlossene Informationskreisläufe geschaffen werden. Produktionsaufträge lassen sich betriebsparallel verfolgen, Leistungskennzahlen zielgerichtet ermitteln und für situationsbasierte Steuerungsentscheidungen bereitstellen. Das RFID-basierte hybride Informationsmanagement stellt damit die informationstechnische Grundlage für die im nachstehenden Kapitel 8 erarbeiteten situationsbasierten Steuerungsverfahren dar.

8 Situationsbasierte Steuerungsverfahren

8.1 Übersicht

Die beiden Systemelemente steuerungorientierte Produktionsmodularisierung und RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement schaffen die betriebsorganisatorische und informationstechnische Grundlage zur Entwicklung und Ausführung des dritten Systemelements situationsbasierte Steuerungsverfahren (vgl. Abbildung 34). Motivation zur Entwicklung dieser Steuerungsverfahren ist die Steigerung der logistischen Zielerreichung mit Hilfe einer zielgerichteten Erfüllung der Aufgaben der Produktionssteuerung Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung (vgl. Abschnitt 2.3.4). Die Steuerungsverfahren adressieren dabei, unter Berücksichtigung der aktuellen Situation freigegebener Produktionsaufträge, alle drei Steuerungsaufgaben gleichermaßen und gewährleisten somit eine ganzheitliche und situationsbasierte Ausführung der Produktionssteuerung.

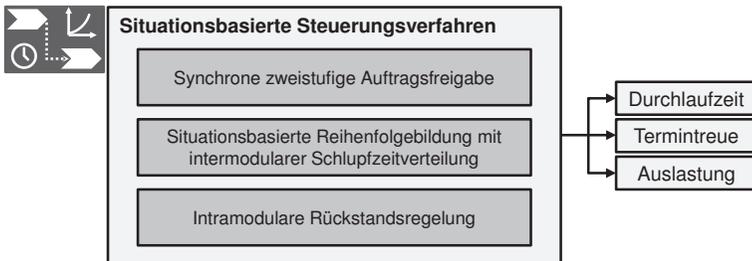


Abbildung 34: Übersicht der situationsbasierten Steuerungsverfahren

Die *synchrone zweistufige Auftragsfreigabe* (vgl. Abschnitt 8.2) hat zum Ziel, die Produktionsabläufe der Produktkomponenten eines zu montierenden Produktes zeitlich und produktspezifisch zu synchronisieren. Sie fokussiert dabei auf möglichst geringe Durchlaufzeiten der Produktkomponenten in der Produktion, was gleichzeitig die immer wichtiger werdende logistische Zielgröße Termintreue begünstigt (vgl. Abschnitt 2.3.2).

Mit Hilfe der *situationsbasierten Reihenfolgebildung* (vgl. Abschnitt 8.3), d. h. die Auftragssequenzierung der tatsächlich vor einem Arbeitssystem wartenden Produktionsaufträge, kann die Termintreue einer Produktion maßgeblich gesteigert werden. Voraussetzung hierfür ist, dass alle für ein terminorientiertes Steuerungsverfahren notwendigen auftragsspezifischen Informationen zu Verfügung stehen. Mit Hilfe der *intermodularen Schlupfzeitverteilung* können die Nachteile des terminorientierten Reihenfolgebildungsverfahrens Schlupfzeitregelung überwunden werden, wodurch das Verfahren gleichzeitig an Effektivität gewinnt.

Zudem erlaubt das RFID-basierte hybride Informationsmanagement, im Falle von Engpass-Produktionsmodulen, die Ausführung der auslastungsorientierten rüstzeitoptimierenden Reihenfolgebildung unter Einhaltung vorgegebener Terminalschränken.

Eine kontinuierliche und möglichst exakte Rückstandsmessung stellt die Voraussetzung einer zielgerichteten Rückstandsregelung dar. Im Rahmen der *intramodularen Rückstandsregelung* (vgl. Abschnitt 8.4) erfolgt diese Messung mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements. Auf dieser Basis stehen in Abhängigkeit der modulspezifischen Kapazitätsflexibilität unterschiedliche Möglichkeiten zur Verfügung, etwaige Rückstände der Produktionsaufträge schnell aufzulösen und damit die logistische Zielgröße Termintreue zu steigern.

8.2 Synchrone zweistufige Auftragsfreigabe

8.2.1 Allgemeines

Die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe basiert auf der Produktionsplanung und definiert den Zeitpunkt, zu dem ein Produktionsauftrag für die Ausführung der eigentlichen Produktion freigegeben wird. Sie verfolgt dabei das Ziel, die Bearbeitungsschritte von den zuvor definierten Haupt- und NebenkompONENTEN eines zu montierenden Produktes vertikal zu synchronisieren (vgl. Abschnitte 4.2.3 und 6.4.2). Während die Auftragsfreigabe der Hauptkomponenten auf der ersten Freigabestufe erfolgt, werden die NebenkompONENTEN auf der zweiten Freigabestufe für die Bearbeitung zugelassen. Die Synchronisation kann dabei sowohl rein zeitlich als auch unter Berücksichtigung produktspezifischer Merkmale erfolgen. Die Umsetzung des Ablaufs der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe erfolgt auf der zentralen Steuerungsebene unter Einsatz des Steuerungsassistenzsystems (vgl. Abschnitt 7.2.2.1) (ENGELHARDT et al. 2013).

Für die *zeitliche Synchronisation* von Produktionsabläufen ist es erforderlich, dass im Zuge der steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung Synchronisationspunkte in der modularisierten Produktion definiert werden (vgl. Abschnitt 6.4.2). In dem Moment, wenn eine Hauptkomponente einen bestimmten Synchronisationspunkt und somit einen gewissen Bearbeitungsfortschritt erreicht hat, werden die relevanten NebenkompONENTEN ad hoc zur Bearbeitung freigegeben, sodass die Montage der beiden Produktkomponenten, aufgrund synchroner Produktionsabläufe, mit minimaler Liege- und damit Durchlaufzeit stattfinden kann. Daraus resultieren unmittelbar ein möglichst geringer Umlaufbestand und eine gesteigerte Termintreue.

Mit Hilfe der im Rahmen des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements eingeführten produktspezifischen Ereignisse lässt sich, im Falle von zu

synchronisierenden Fertigungsprozessen, neben der zeitlichen zudem eine *produktspezifische Synchronisation* der Bearbeitungsschritte vornehmen. Dabei werden Qualitätsmerkmale, die im Rahmen der Qualitätssicherung einer Hauptkomponente erfasst wurden, bei der Fertigung der relevanten Nebenkomponeuten berücksichtigt (z. B. produktspezifische Anpassung der Fertigungsparameter), um eine möglichst hohe Qualität des zu montierenden Produktes realisieren zu können. Dies ist insbesondere für Produktionsbereiche mit hohen Qualitätsanforderungen (z. B. Turbinenfertigung) relevant und wird als *Matched Assembly* bezeichnet.

Die Situationsbezogenheit der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe wird dadurch sichergestellt, dass die Freigabe der Hauptkomponenten auf der ersten Freigabestufe in Abhängigkeit des aktuellen Umlaufbestandes bzw. der momentanen Belastung in der Produktion vorgenommen wird. Hierfür werden ausschließlich bestandsregelnde Auftragsfreigabeverfahren eingesetzt (vgl. Abschnitt 4.2.2.1), die mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements ereignisorientiert ausgeführt werden. Die Auftragsfreigabe der Nebenkomponeuten auf der zweiten Freigabestufe erfolgt wiederum in direkter Abhängigkeit zum Bearbeitungsfortschritt der jeweiligen Hauptkomponente und damit ebenfalls situationsbasiert auf Basis eines produktspezifischen Ereignisses. Die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe ist somit nach den in Abschnitt 4.2.2.1 eingeführten Merkmalen als *bestandsregelndes Auftragsfreigabeverfahren* zu bezeichnen, welches die Arbeitsvorgänge eines Produktionsauftrags nicht als Ganzes, sondern in Abhängigkeit der Produktkomponenten *ereignisorientiert* auf zwei Stufen freigibt und somit einen *hohen Detaillierungsgrad* aufweist.

8.2.2 Erste Freigabestufe der synchronen Auftragsfreigabe

8.2.2.1 Einführung

Auf der *ersten Freigabestufe* der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe werden die Hauptkomponenten eines Produktes bzw. Auftrags (vgl. Abschnitt 6.4.2) unter Einsatz bestandsregelnder Verfahren für die Produktion freigegeben. Diese Auftragsfreigabeverfahren werden analysiert und bei Bedarf derart adaptiert, dass die Steuerungsentscheidung ereignisorientiert, stets in Abhängigkeit der aktuellen Auftragsituation ausgeführt wird. Eine solche Adaption ist gemäß LÖDDING (2008) möglich, auch wenn die Verfahren in der Literatur mit einer periodischen Auslösungslogik beschrieben sind. Unter Berücksichtigung der steuerungsrelevanten Merkmale einer Produktion, wie beispielsweise Fertigungsprinzip und Variantenanzahl, sind verschiedene konventionelle bestandsregelnde Verfahren zur Auftragsfreigabe der Hauptkomponenten relevant.

Der Umlaufbestand der Produktion stellt für die bestandsregelnden Steuerungsverfahren eine wichtige Regelgröße dar. Im Falle der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe wird der Umlaufbestand, je nach gewählter Maßeinheit, durch die Anzahl der freigegebenen Produktionsaufträge, deren Produktkomponenten (Haupt- und Nebenkomponenten) oder Vorgabezeiten beschrieben. Sofern die zweite Freigabestufe eines Auftrags noch nicht ausgeführt wurde, ist es dennoch erforderlich, die noch nicht zur Produktion freigegebenen Nebenkomponenten ebenfalls bei der Bestimmung des Umlaufbestandes zu berücksichtigen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden aus Gründen der Akzeptanz und Umsetzbarkeit die in der Praxis meist verbreiteten und in der Literatur häufig diskutierten bestandsregelnden Steuerungsverfahren (vgl. Abschnitt 4.2.2.1) für die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe spezifiziert und eventuell adaptiert. Diese Verfahrensspezifikation erfolgt dabei in Bezug auf die steuerungorientiert instanziierten Produktionsmodule sowie die ereignisorientierte Ausführung unter Einsatz des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements. Es wird ein *Verfahrenskatalog* erarbeitet, der situationsbasierte Steuerungsverfahren zur Auftragsfreigabe der Hauptkomponenten beschreibt, die unter Einsatz des Steuerungsassistenzsystems umgesetzt werden können. Welches Steuerungsverfahren für einen vorliegenden Anwendungsfall jeweils eingesetzt werden sollte, muss im Rahmen der sogenannten Konfiguration der Produktionssteuerung bestimmt und entschieden werden (LÖDDING 2008). Die Verfahrensparametrierung (z. B. Definition von Bestandsgrenzen) erfolgt, wie bei der konventionellen Umsetzung, anwendungsfallspezifisch. Dabei kann auf die Daten der betriebsparallelen Leistungsanalyse (z. B. mittlere Durchlaufzeit eines Auftrags) zurückgegriffen werden (vgl. Abschnitt 7.2.2.1).

8.2.2.2 Katalog situationsbasierter Auftragsfreigabeverfahren

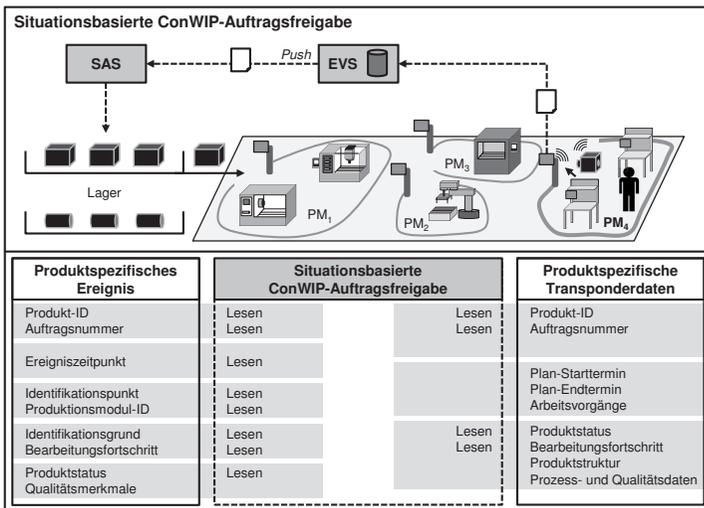
Situationsbasierte ConWIP-Auftragsfreigabe

Um den Umlaufbestand in der steuerungorientiert modularisierten Produktion, gemäß der Zielstellung des Steuerungsverfahrens ConWIP, auf einem konstanten Niveau (Anzahl an Aufträgen, Anzahl an Bauteilen oder Arbeitsvorrat in Vorgabestunden) zu halten (vgl. Abschnitt 4.2.2.1), werden die Hauptkomponenten eines Produktes bzw. Auftrags erst dann freigegeben, wenn der Umlaufbestand bei der Fertigstellung eines Produktionsauftrags eine definierte Grenze unterschreitet. Das Steuerungsassistenzsystem kennt dabei die Verfahrensparameter des Steuerungsverfahrens (z. B. kritisches Bestandsniveau), führt die erste Freigabestufe stets in Abhängigkeit eines produktspezifischen Ereignisses aus und kommuniziert den freigegebenen Auftrag ad hoc an den relevanten SAS-Mitarbeiterdialog. Die Schnittstelle zum Ereignisverwaltungssystem wird hinsichtlich dieses Steuerungsverfahrens im sogenannten Push-Modus betrieben (vgl. Abschnitt 7.2.2.2).

8.2 Synchrone zweistufige Auftragsfreigabe

Sofern der Umlaufbestand über die Anzahl der freigegebenen Produktionsaufträge beschrieben wird, erfolgt die Freigabe einer weiteren Hauptkomponente auf Basis des produktspezifischen Ereignisses, das beim Bearbeitungsende desjenigen Produktes generiert wird, welches die Fertigstellung des zugehörigen Produktionsauftrags (finaler Auftragsstatus) bestätigt. Falls die Bauteileanzahl oder die Vorgabezeit eines Auftrags als Maßeinheit für das Bestandsniveau eingesetzt werden, erfolgt die Auftragsfreigabe nach ähnlichem Prinzip. Hierbei muss jedoch das Steuerungsassistenzsystem vor der Freigabeerteilung jeweils einen Produktionsauftrag in der Liste freizugebender Aufträge ermitteln, der den geforderten Freigabekriterien (z. B. auftragspezifischer Arbeitsvorrat) genügt.

Nachstehende Abbildung 35 zeigt den prinzipiellen Ablauf der situationsbasierten ConWIP-Auftragsfreigabe in der steuerungorientiert modularisierten Produktion unter Einsatz des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements. Das Produktionsmodul PM_4 repräsentiert dabei das finale Produktionsmodul vor der Fertigstellung eines Auftrags, weshalb das an dessen Modulausgang generierte produktspezifische Ereignis als steuerungsrelevant zu bezeichnen ist. Die Abbildung gibt zudem an, auf welche produktspezifischen Ereignis- bzw. Transponderdaten von diesem Auftragsfreigabeverfahren zugegriffen wird.



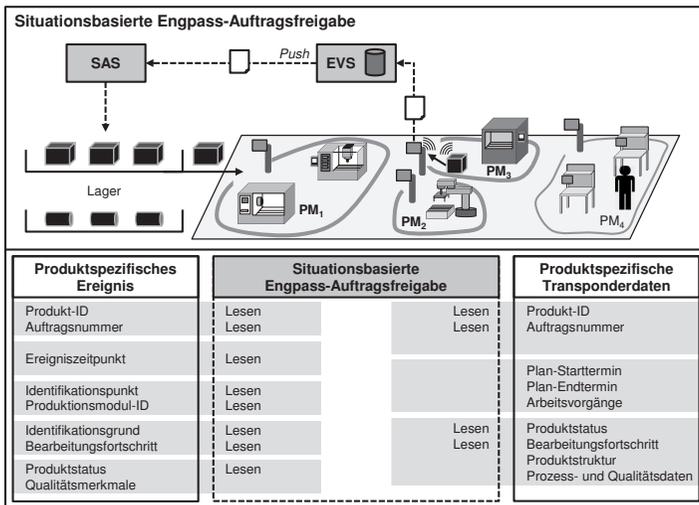
Legende:

SAS: Steuerungsassistenzsystem Hauptkomponente Nebenkomponente Endprodukt
 EVS: Ereignisverwaltungssystem Ereignisinformation SAS-Mitarbeiterdialog
 PM_n : *Finales* Produktionsmodul „Montage“ Steuerungsfluss Materialfluss

Abbildung 35: Situationsbasierte ConWIP-Auftragsfreigabe

Situationsbasierte Engpass-Auftragsfreigabe

Sofern eine Produktionsumgebung ein Engpass-Produktionsmodul aufweist, welches gemäß der Prinzipien der steuerungorientierten Produktionsmodularisierung instanziiert wurde (vgl. Abschnitt 6.3.3), kann die Produktionsumgebung in einen bestandsregulierten Bereich bis einschließlich zum Engpass-Produktionsmodul und einen nicht bestandsregulierten Bereich unterteilt werden. Um Leistungsverluste des Produktionssystems durch die Engpässe zu verhindern, erfolgt die Auftragsfreigabe der Hauptkomponenten eines Produktionsauftrags in Abhängigkeit des Umlaufbestandes im bestandsregulierten Bereich (vgl. Abschnitt 4.2.2.1). Der Umlaufbestand kann dabei ebenfalls in Anzahl an Aufträgen, Anzahl an Bauteilen oder Arbeitsvorrat in Vorgabestunden gemessen werden. Das Steuerungsassistenzsystem arbeitet, ähnlich der situationsbasierten ConWIP-Steuerung, im Push-Modus. Es führt die erste Freigabestufe auf Basis eines produktspezifischen Ereignisses aus, wenn der steuerungrelevante Umlaufbestand, aufgrund der Fertigstellung eines Produktionsauftrags am Engpass-Produktionsmodul, eine definierte Grenze unterschreitet. Der aktualisierte Auftragsvorrat wird dem SAS-Mitarbeiterdialog unmittelbar zur Verfügung gestellt.



Legende:

- SAS: Steuerungsassistenzsystem Hauptkomponente Nebenkomponente
- EVS: Ereignisverwaltungssystem Ereignisinformation SAS-Mitarbeiterdialog
- PM₃: Engpass-Produktionsmodul „Schleifen“ --> Steuerungsfliess → Materialfluss
- PM₁, PM₂, PM₃: Bestandsregulgelter Bereich

Abbildung 36: Situationsbasierte Engpass-Auftragsfreigabe

Abbildung 36 zeigt das Prinzip der situationsbasierten Engpass-Steuerung, die mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements ausgeführt wird. Außerdem werden die steuerungsrelevanten produktspezifischen Ereignis- bzw. Transponderdaten dargestellt. Diese Daten stimmen mit denen der situationsbasierten ConWIP-Auftragsfreigabe überein. Das Produktionsmodul PM_3 wurde in diesem Beispiel als Engpass deklariert und bildet zusammen mit den Produktionsmodulen PM_1 und PM_2 den bestandsgeregelten Bereich.

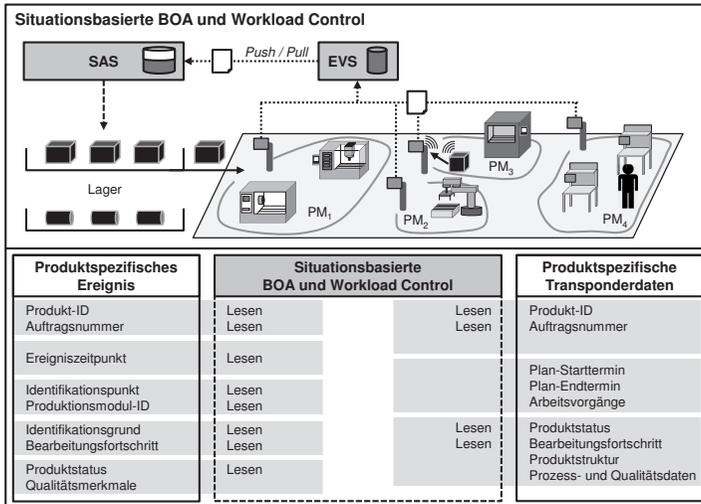
Situationsbasierte BOA und Workload Control

Die situationsbasierte BOA und die situationsbasierte Workload Control basieren, analog der konventionellen Verfahren, auf den drei Elementen Liste freizugebender Aufträge, Bestandsgrenzen und Bestandskonten der Produktionsmodule (vgl. 4.2.2.1). Dabei sorgt das RFID-basierte hybride Informationsmanagement für eine betriebsparallele Bestimmung des aktuellen modulspezifischen Direkt- und Indirektbestands. Im Falle der BOA werden dabei die definierten Abzinsungsfaktoren berücksichtigt. Der Direktbestand bezeichnet den Umlaufbestand in einem Produktionsmodul, während unter dem Indirektbestand diejenigen Produktionsaufträge verstanden werden, die sich in vorgelagerten Produktionsmodulen befinden und das relevante Produktionsmodul in Zukunft belasten werden. Die Bestandsmessung erfolgt auf Basis produktspezifischer Ereignisse, die im Zuge der Erfassung jeder Haupt- und Nebenkomponente bei Bearbeitungsbeginn und -ende an einem Produktionsmodul generiert und im Ereignisverwaltungssystem gespeichert werden. Somit ist das Steuerungsassistenzsystem zu jedem Zeitpunkt in der Lage, die momentane Bestandsabweichung von der modulspezifischen Bestandsgrenze mittels des Pull-Modus zu bestimmen.

Die bei der konventionellen Umsetzung der BOA und Workload Control meist gewählte periodische Auslösungslogik (z. B. Beginn einer Schicht) wird, um die Situationsbezogenheit der Verfahren zu garantieren, im Rahmen der vorliegenden Arbeit durch eine ereignisorientierte Auslösungslogik ersetzt. Hierzu wird ein weiteres Bestandskonto, das sogenannte *Freigabekonto*, im Steuerungsassistenzsystem abgebildet. Auf diesem Konto werden abgeschlossene Produktionsaufträge mit Hilfe des Push-Modus eingebucht. Sofern der Umlaufbestand in der Maßeinheit Auftragsanzahl gemessen wird, wächst das Freigabekonto mit jedem abgeschlossenen Produktionsauftrag um eine Einheit. Falls die Bestandsmessung in Vorgabestunden erfolgt, wird die volle Vorgabezeit eines abgeschlossenen Produktionsauftrags in das Freigabekonto eingebucht. Sobald die definierte Bestandsgrenze des Freigabekontos erreicht wird, erfolgt die ereignisorientierte Auslösung der situationsbasierten Verfahren zur Auftragsfreigabe. Darauf folgend wird der aktualisierte Arbeitsvorrat an den relevanten SAS-Mitarbeiterdialog kommuniziert.

8 Situationsbasierte Steuerungsverfahren

Das Steuerungsprinzip bzw. die Messung des aktuellen modulspezifischen Direkt- und Indirektbestands mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements ist in Abbildung 37 dargestellt. Die für die Verfahrensausführung notwendigen produktspezifischen Ereignis- und Transponderdaten werden ebenfalls benannt.



Legende:

SAS: Steuerungsassistenzsystem Hauptkomponente Nebenkomponente Freigabekonto
 EVS: Ereignisverwaltungssystem Ereignisinformation SAS-Mitarbeiterdialog
> Informationsfluss zur Bestandsmessung <- -> Steuerungsfloss -> Materialfluss

Abbildung 37: Situationsbasierte BOA und Workload Control

Dezentrale bestandsregelnde Auftragsfreigabeverfahren (z. B. Polca und DBF) (vgl. Abschnitt 4.2.2.1) eignen sich für die erste Freigabestufe der synchronen Auftragsfreigabe nur bedingt. Deshalb werden solche Verfahren nicht für die situationsbasierte Ausführung mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements im Rahmen der vorliegenden Arbeit spezifiziert.

8.2.3 Zweite Freigabestufe der synchronen Auftragsfreigabe

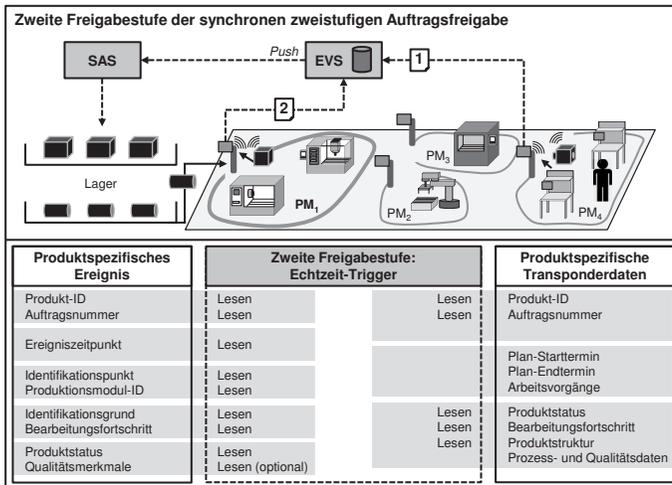
8.2.3.1 Zeitliche Synchronisation

Das wesentliche Ziel der zweiten Stufe der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe ist die Reduzierung von Durchlaufzeiten und Umlaufbeständen durch die vertikale *zeitliche Synchronisation* der Produktionsabläufe von zu montierenden Haupt- und Nebenkomponenten eines Produktionsauftrags. Um dieses Ziel

zu erreichen, setzt die Auftragsfreigabe der Nebenkompenten auf den Synchronisationspunkten auf, die mit Hilfe der steuerungorientierten Produktionsmodularisierung instanziiert wurden (vgl. Abschnitt 6.4.2). Die zweite Freigabestufe wird damit, unabhängig von den bestandsregelnden Verfahren der ersten Freigabestufe, ereignisorientiert vom Steuerungsassistenzsystem ausgeführt. Sobald die Hauptkomponenten eines Produktionsauftrags einen definierten Bearbeitungsfortschritt erreicht haben, werden die relevanten Nebenkompenten über das am entsprechenden Synchronisationspunkt generierte Ereignis, das den kritischen Auftragsstatus belegt, zur Bearbeitung freigegeben. Dieses Ereignis wird als *Echtzeit-Trigger* bezeichnet und vom Ereignisverwaltungssystem über den Push-Modus direkt an das Steuerungsassistenzsystem zur Ad-hoc-Freigabe weitergeleitet. Das Steuerungsassistenzsystem aktualisiert unmittelbar den Auftragsvorrat des betreffenden Produktionsmoduls um die gerade freigegebenen Nebenkompenten und kommuniziert den entsprechenden Produktionsauftrag unter Einsatz des jeweiligen SAS-Mitarbeiterdialogs. Mit Hilfe der zweiten Freigabestufe ist es somit möglich, die Produktion von zusammengehörigen Produktkomponenten (Haupt- und Nebenkompenten) zeitlich zu synchronisieren und deren Montageprozess mit minimalen Liegezeiten auszuführen. Um diese synchronisierten Produktionsabläufe realisieren zu können, werden auf der zweiten Freigabestufe neben dem Echtzeit-Trigger keine weiteren Kriterien berücksichtigt. Die Freigabe der Nebenkompenten weist somit eine höhere Priorität auf als die der Hauptkomponenten.

Zur Absicherung der Synchronisation und der anschließenden Montage der Haupt- und Nebenkompenten sind, wie in Abschnitt 7.2.4.3 dargestellt, auf dem RFID-Transponder einer Nebenkompente unter dem Datum Produktstruktur die Produkt-ID der zugehörigen Hauptkomponente gespeichert. Umgekehrt verfügt die Hauptkomponente auf ihrem RFID-Transponder über die entsprechenden Produkt-IDs der montagerelevanten Nebenkompenten.

Abbildung 38 zeigt zusammenfassend die für die zweite Freigabestufe relevanten produktspezifischen Ereignis- und Transponderdaten. Zudem wird der prinzipielle Ablauf der zweiten Freigabestufe in Kombination mit einer situationsbasierten ConWIP-Auftragsfreigabe auf der ersten Stufe verdeutlicht. Der Ausgang des Produktionsmoduls PM_1 stellt den Synchronisationspunkt für die Generierung des Echtzeit-Triggers dar. Das Produktionsmodul PM_4 repräsentiert wiederum das finale Produktionsmodul eines Auftrags, durch dessen Fertigstellung die erste Freigabestufe ausgelöst wird.



Legende:

- SAS: Steuerungsassistenzensystem Hauptkomponente Nebenkomponente Endprodukt
 EVS: Ereignisverwaltungssystem Ereignisinformationen: Stufe 1 (ConWIP), Stufe 2 (Echtzeit-Trigger)
 PM₄: *Finales* Produktionsmodul „Montage“ --> Steuerungsfluss → Materialfluss
 PM_i: Produktionsmodul mit *Synchronisationspunkt* zur Freigabe der Nebenkomponente

Abbildung 38: Steuerungsablauf und -daten der zweiten Freigabestufe

8.2.3.2 Produktspezifische Synchronisation

Um im Falle von zu synchronisierenden Fertigungsprozessen (z. B. Herstellung von Passungen) zusätzlich eine *produktspezifische Synchronisation* der Produktionsabläufe als Matched Assembly realisieren zu können, ist es in einem ersten Schritt notwendig, die für die Synchronisation steuerungsrelevanten Qualitätsmerkmale (z. B. Bohrungsdurchmesser) einer Hauptkomponente zu definieren. Darauf folgend wird der entsprechende Qualitätsprüfungsprozess in den Ablauf des Produktionsmoduls integriert, in welchem der kritische Synchronisationspunkt umgesetzt wurde (vgl. Abschnitte 6.4.2 und 7.2.3.1). Bei der Erfassung einer Hauptkomponente, die einer entsprechenden Qualitätsprüfung unterzogen wurde, wird am Ausgang bzw. letzten Arbeitssystem eines Produktionsmoduls, wie in Abbildung 38 dargestellt, ein produktspezifisches Ereignis generiert. Dieses speichert die Ausprägungen der geprüften Qualitätsmerkmale, gemäß der in Abschnitt 7.2.4.2 eingeführten Datenstruktur. Aus diesem Grund ist die produktspezifische Synchronisation, entgegen der rein zeitlichen, auf Produktionsaufträge der Losgröße 1 beschränkt. Ein produktspezifisches Ereignis kann zwar, den Ausführungen in Abschnitt 7.2.4.2 folgend, den Bearbeitungsfortschritt bzw. Status eines Auftrags größerer Losgröße belegen, jedoch sieht die Datenstruktur

ausschließlich die Speicherung von Qualitätsmerkmalen vor, die zu dem spezifischen intelligenten Produkt zählen, welches das Ereignis ausgelöst hat.

Das generierte produktspezifische Ereignis wird als Echtzeit-Trigger, analog der zeitlichen Synchronisation, vom Ereignisverwaltungssystem im Push-Modus an das Steuerungsassistenzsystem weitergeleitet. Dieses erteilt unmittelbar die Freigabe der relevanten Nebenkomponekte über den SAS-Mitarbeiterdialog. Im Falle der produktspezifischen Synchronisation werden nun zusätzlich die im Ereignis gespeicherten Qualitätsmerkmale ausgelesen und dem Produktionsmodul zur Anpassung von Fertigungsparametern zur Verfügung gestellt. Beispielsweise ist es sinnvoll, dass das Steuerungsassistenzsystem die automatische Adaption der relevanten Fertigungsprogramme einer CNC (Computerized Numerical Control)-Maschine, die über ein DNC (Distributed Numerical Control)-System verwaltet werden, auslöst. Die produktspezifische Synchronisation von Fertigungsprozessen eignet sich somit besonders für Produkte, die sehr hohen Qualitätsanforderungen genügen müssen.

8.3 Situationsbasierte Reihenfolgebildung

8.3.1 Allgemeines

Die Aufgabe der situationsbasierten Reihenfolgebildung ist die dezentrale Priorisierung der in einem Produktionsmodul zur Bearbeitung wartenden Produktionsaufträge nach arbeitssystemspezifisch definierten Regeln. Die notwendige Echtzeit-Informationsbasis hierzu liefern vor allem das intelligente Produkt und der SAS-Mitarbeiterdialog als dezentrale Steuerungselemente des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements. Als Ergebnis der situationsbasierten Reihenfolgebildung wird dem Verantwortlichen im Produktionsmodul der sequenzierte Auftragsvorrat zur Verfügung gestellt, der wie vorgegeben abgearbeitet werden sollte. Um auf mögliche unvorhergesehene Ereignisse (z. B. Eilaufträge, Maschinenstörungen) reagieren zu können, wird eine dezentrale Selbstoptimierung, im Sinne einer gezielten Umplanung der Auftragssequenz in einem vorgegebenen zeitlichen Rahmen, ermöglicht. Hierzu werden über die intuitive Informationsbereitstellung des SAS-Mitarbeiterdialogs (vgl. Abschnitt 7.2.3.1) zusätzliche steuerungsrelevante Informationen kommuniziert.

Sofern es sich nicht um ein Engpass-Produktionsmodul (vgl. Abschnitt 6.3.3) handelt, werden die Aufträge am Moduleingang bzw. an ihrem ersten Arbeitssystem im Produktionsmodul stets nach der terminorientierten *situationsbasierten Schlupfzeitregelung* sequenziert, deren Effektivität maßgeblich durch eine betriebsparallele *intermodulare Schlupfzeitverteilung* gesteigert wird. Ab dem zweiten auftragsspezifischen Arbeitssystem erfolgt die Reihenfolgebildung kon-

sequent nach dem terminorientierten Steuerungsverfahren *First In - First Out (FIFO)*, das die von der Schlupfzeitregelung vorgegebene Auftragssequenz durchsetzt. Der Grund für diese terminorientierte Steuerung ist die steigende Bedeutung der logistischen Zielgröße Termintreue (vgl. Abschnitt 2.3.2), die mit der situationsbasierten Reihenfolgebildung adressiert wird.

An einem Engpass-Produktionsmodul werden die Produktionsaufträge, unter Einhaltung fest vorgegebener Terminschranken, nach der Prioritätsregel *situationsbasierte rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung* sequenziert. Das Ziel dieses Steuerungsverfahrens ist die terminabgesicherte Erhöhung der Auslastung von Engpass-Arbeitssystemen, was den Ablauf der gesamten Produktion positiv beeinflusst. Falls durch das Steuerungsverfahren Rückstand abgebaut wird, leistet es zudem einen positiven Beitrag zur Steigerung der Termintreue (LÖDDING 2008).

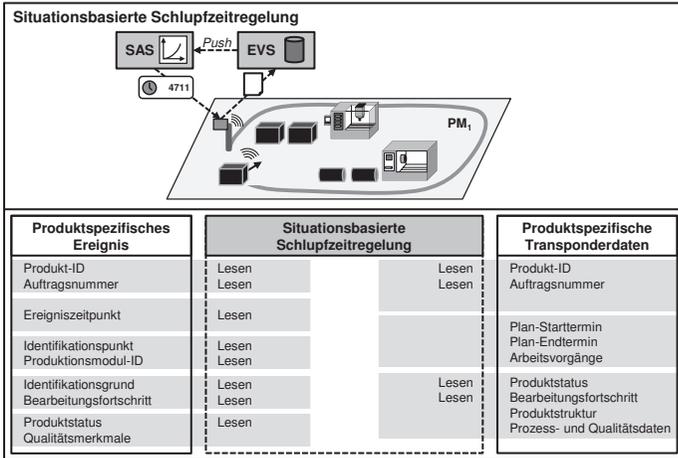
8.3.2 Situationsbasierte Reihenfolgebildungsverfahren

8.3.2.1 Situationsbasierte Schlupfzeitregelung

Die situationsbasierte Schlupfzeitregelung, die zur Reihenfolgebildung am ersten auftragsspezifischen Arbeitssystem eines Produktionsmoduls vom SAS-Mitarbeiterdialog ausgeführt wird, entspricht im prinzipiellen Ablauf dem konventionellen Steuerungsverfahren, bei dem die Priorisierung der wartenden Aufträge ebenfalls nach der Schlupfzeit erfolgt (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Entgegen der konventionellen Schlupfzeitregelung wird jedoch bei diesem situationsbasierten Steuerungsverfahren die *modulspezifische* Schlupfzeit eines Produktionsauftrags als Grundlage zur Reihenfolgebildung genutzt. Diese sogenannte *Modulschlupfzeit* bezeichnet den durch die intermodulare Schlupfzeitverteilung (vgl. Abschnitt 5.2) bestimmten Anteil an der Gesamtschlupfzeit (vgl. Abschnitt 4.2.2.2), der einem Produktionsmodul zur Reihenfolgebildung zur Verfügung steht. Die Schlupfzeitverteilung, d. h. die Bestimmung der Modulschlupfzeit, erfolgt situationsbasiert und betriebsparallel durch das Steuerungsassistenzsystem.

Mit Hilfe der informationstechnischen Erfassung eines intelligenten Produktes wird die intermodulare Schlupfzeitverteilung ereignisbasiert über den Push-Modus des Ereignisverwaltungssystems aufgerufen. Dabei referenziert ein intelligentes Produkt über seine Auftragsnummer unmittelbar auf den zugehörigen Produktionsauftrag. Das Ergebnis der Schlupfzeitverteilung, die aktuelle Modulschlupfzeit des Produktionsauftrags, wird dem SAS-Mitarbeiterdialog ad hoc zur Verfügung gestellt und dient diesem zur Aktualisierung der Bearbeitungsreihenfolge am ersten Arbeitssystem des Produktionsmoduls. Dabei erhält derjenige Auftrag die höchste Priorität zur Bearbeitung, der aktuell die kleinste Modulschlupfzeit besitzt.

Abbildung 39 gibt an, welche produktspezifischen Ereignis- bzw. Transponderdaten für die situationsbasierte Schlupfzeitregelung sowie die intermodulare Schlupfzeitverteilung notwendig sind.



Legende:

- SAS: Steuerungsassistenzsystem Hauptkomponente Nebenkomponente Ereignisinformation
 EVS: Ereignisverwaltungssystem 4711 Auftragspezifische Modulschlupfzeit Schlupfzeitverteilung
 PM_i: Produktionsmodul „Kleine Zerspanung“ --> Steuerungsfluss → Materialfluss

Abbildung 39: Situationsbasierte Schlupfzeitregelung

8.3.2.2 First In - First Out (FIFO)

Sofern ab dem zweiten Arbeitssystem eines auftragspezifischen Moduldurchlaufs keine eigene Instanz des SAS-Mitarbeiterdialogs implementiert ist, werden die Produktionsaufträge nach dem FIFO-Prinzip priorisiert. Dieses Steuerungsverfahren benötigt keine informationstechnische Unterstützung durch das RFID-basierte hybride Informationsmanagement. Eine Adaption hinsichtlich der situationsbasierten Ausführung des Verfahrens wird aus diesem Grund nicht vorgenommen. Da durch dieses Steuerungsverfahren Reihenfolgevertauschungen vermieden und geringe Durchlaufzeitstreuungen erzielt werden, kann es als terminorientiertes Reihenfolgebildungsverfahren verstanden werden, welches mit der situationsbasierten Schlupfzeitregelung geeignet harmonisiert (vgl. Abschnitt 4.2.2.2).

8.3.2.3 Situationsbasierte rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung

Die situationsbasierte rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung dient zur auslastungsorientierten Auftragssequenzierung in einem Engpass-Produktionsmodul

(vgl. Abschnitt 6.3.3) und wird von einer arbeitssystemspezifischen Instanz des SAS-Mitarbeiterdialogs auf Basis aktueller Informationen ausgeführt. Bei diesem Steuerungsverfahren wird derjenige Produktionsauftrag an einem Engpass-Arbeitssystem am höchsten priorisiert, der ausgehend von dem gerade bearbeiteten Auftrag die geringsten Rüsttätigkeiten verursacht und somit die kleinste Rüstzeit aufweist. Informationstechnische Grundlage hierfür stellt die RFID-basierte Identifikation der wartenden Produktionsaufträge am Arbeitssystem dar. Mit der Generierung eines produktspezifischen Ereignisses und dessen Weiterleitung an das Steuerungsassistenzsystem (Push-Modus), welches die auftragspezifischen Rüstumfänge und -zeiten von der Arbeitsvorbereitung zur Verfügung gestellt bekommt (vgl. Abschnitt 7.2.2.1), werden diese steuerungsrelevanten Informationen ad hoc an den SAS-Mitarbeiterdialog kommuniziert. Auf Basis des aktuellen Arbeitsvorrats und des gerade bearbeiteten bzw. in Bearbeitung befindlichen Produktionsauftrags wird, unter der Zielvorgabe geringster Rüstaufwände, der nächste zu bearbeitende Auftrag an den Verantwortlichen am Arbeitssystem kommuniziert. Hierzu nutzt der SAS-Mitarbeiterdialog eine *arbeitssystemspezifische Rüstmatrix*, die alle Rüstzeiten bezüglich des aktuellen Arbeitsvorrats enthält, die erforderlich sind, um das Arbeitssystem von einem Rüstzustand zur Bearbeitung eines Auftrags i in einen Rüstzustand zur Bearbeitung eines Auftrags j zu überführen (vgl. Tabelle 6) (VAHRENKAMP 2004).

Tabelle 6: Beispielhafte Rüstmatrix (VAHRENKAMP 2004)

$t_r(P_{ij}, P_{kl})$	P_{11}	P_{12}	P_{13}	P_{21}	P_{22}
P_{11}		15 min	30 min	10 min	5 min
P_{12}	20 min		30 min	15 min	10 min
P_{13}	10 min	40 min		20 min	5 min
P_{21}	20 min	10 min	10 min		15 min
P_{22}	10 min	15 min	5 min	30 min	

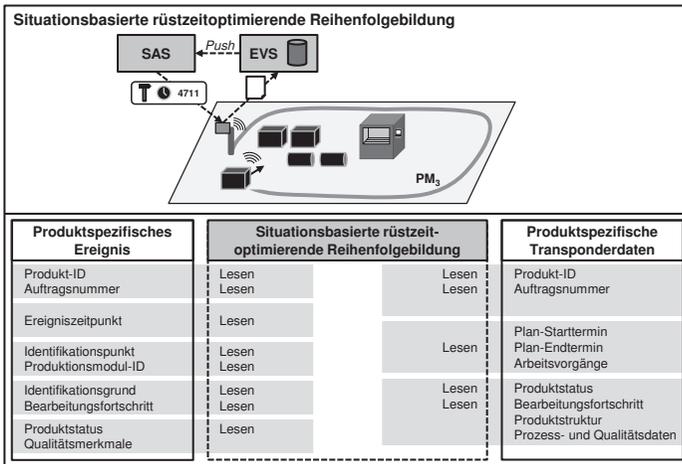
Legende:

$t_r(P_{ij}, P_{kl})$: Rüstzeit von Rüstzustand P_{ij} nach Rüstzustand P_{kl}
 P_{ij}, P_{kl} : Komponente j bzw. l von Produkt i bzw. k

Entgegen der konventionellen rüstzeitoptimierenden Reihenfolgebildung (vgl. Abschnitt 4.2.2.2) wird bei diesem Steuerungsverfahren zudem, um neben der Situationsbezogenheit die Terminorientierung der Produktionsabläufe zu garantieren, der *modulspezifische Plan-Endtermin* als Nebenbedingung der Sequenzierung berücksichtigt. Dieser Plan-Endtermin beschreibt den geplanten Zeitpunkt des Bearbeitungsendes eines Auftrags in einem Produktionsmodul. Er wird situationsbasiert mit Hilfe des Steuerungsassistenzsystems berechnet, dessen betriebsparallele Leistungsanalyse (vgl. Abschnitt 7.2.2.1) durch die Ereignisgenerierung am Arbeitssystem mittels des Push-Modus aufgerufen wird. Der modulspezifische Plan-Endtermin wird damit auf Basis aktueller mittlerer Durchlaufzeiten berechnet und dem SAS-Mitarbeiterdialog unmittelbar zur *Terminüberprüfung* der rüstzeitoptimierten Auftragssequenz bereitgestellt. Hierbei wird

sichergestellt, dass die rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung ausgeführt wird, ohne dass ein Produktionsauftrag seinen modulspezifischen Plan-Endtermin, im Sinne einer Terminschranke, überschreitet. Falls eine Terminüberschreitung durch einen Auftrag erfolgen würde, wird dieser entsprechend dem in Abschnitt 4.2.2.2 eingeführten Steuerungsverfahren Frühester Plan-Endtermin (FPE) zur Bearbeitung am höchsten priorisiert.

Die zur Ausführung der situationsbasierten rüstzeitoptimierenden Reihenfolgebildung notwendigen Ereignis- und Transponderdaten werden in Abbildung 40 dargestellt.



Legende:

- SAS: Steuerungssystem Hauptkomponente Nebenkomponente Ereignisinformation
 EVS: Ereignisverwaltungssystem Steuerungsfluss Materialfluss PM₃: Engpass-Modul
 Auftragspezifische Rüstumfänge und -zeiten sowie modulspezifischer Plan-Endtermin

Abbildung 40: Situationsbasierte rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung

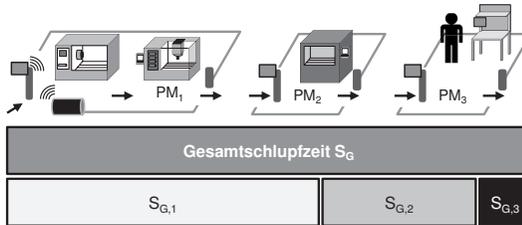
8.3.3 Intermodulare Schlupfzeitverteilung

8.3.3.1 Einführung

Gemäß Abschnitt 4.2.2.2 stellt die Sequenzierung nach der Schlupfzeit ein zur terminorientierten Reihenfolgebildung sehr leistungsfähiges Steuerungsverfahren dar. Aufgrund der Tatsache, dass bei der konventionellen Umsetzung dieses Verfahrens ein Produktionsauftrag unmittelbar nach der Auftragsfreigabe in der Regel einen hohen Gesamtschlupf besitzt, wird dieser Auftrag an dessen ersten Produktionsmodul bzw. Arbeitssystem gering zur Bearbeitung priorisiert. Ein Großteil der zur Verfügung stehenden Schlupfzeit verstreicht ungenutzt und

8 Situationsbasierte Steuerungsverfahren

nachfolgende Produktionsmodule haben keine Möglichkeit, etwaige Verzögerungen im Produktionsablauf durch vorhandenen Schlupf auszugleichen (vgl. Abbildung 41). Darüber hinaus erzeugt die konventionelle Schlupfzeitregelung häufige Reihenfolgevertauschungen und damit eine gewisse Unruhe im Produktionsablauf, die zu starken Durchlaufzeitstreuungen führt.



Legende:

PM_k : Produktionsmodul k

$S_{G,k}$: Modulschlupfzeit von PM_k

Abbildung 41: Konventionelle Schlupfzeitregelung ohne Schlupfzeitverteilung (ENGELHARDT et al. 2014)

Unter der intermodularen Schlupfzeitverteilung wird ein Steuerungsverfahren verstanden, das die Gesamtschlupfzeit eines Produktionsauftrags anforderungsgerecht (z. B. in Abhängigkeit der modulspezifischen Durchlaufzeit) auf alle von diesem Auftrag noch zu durchlaufenden Produktionsmodule verteilt. Der vorliegende Abschnitt nimmt unmittelbaren Bezug auf ENGELHARDT et al. (2014). Es gilt:

$$S_G = \sum_k S_{G,k} \quad (5)$$

mit S_G Gesamtschlupfzeit [BKT]

$S_{G,k}$ Modulschlupfzeit aller noch zu durchlaufender Module PM_k [BKT]

Mit Hilfe der im Steuerungsassistenzsystem abgebildeten intermodularen Schlupfzeitverteilung, die im Zuge der situationsbasierten Schlupfzeitregelung über das intelligente Produkt ereignisbasiert aufgerufen wird (vgl. Abschnitt 8.3.2), können die aufgeführten Nachteile überwunden und die Effektivität der Schlupfzeitregelung zur Erreichung einer hohen Termintreue maßgeblich gesteigert werden. Dabei wird das am Arbeitssystem generierte produktspezifische Ereignis im Push-Modus an das Steuerungsassistenzsystem weitergeleitet und die intermodulare Schlupfzeitverteilung, vor allem unter Berücksichtigung der Ereignisdaten Auftragsnummer und Bearbeitungsfortschritt (vgl. Abschnitt 7.2.4.2), betriebsparallel ausgeführt. Das Verfahren sorgt dabei für die situationsbasierte Berechnung und Ad-hoc-Bereitstellung der Modulschlupfzeit, auf deren Basis die eigentliche Reihenfolgebildung vorgenommen wird. Darüber hinaus schafft die „gerechte“ Verteilung der Gesamtschlupfzeit Potenzial zur Selbstoptimierung im Produktionsmodul, im Sinne einer zielgerichteten, dezentralen Umplanung

von Aufträgen im Falle unvorhergesehener Ereignisse. Die Verteilung der Schlupfzeit erfolgt nach sogenannten *Verteilungskriterien*, die gemäß ENGELHARDT et al. (2014) nachfolgend beschrieben werden.

Da das Ziel der situationsbasierten Steuerungsverfahren und im Speziellen der Schlupfzeitregelung die Steigerung der *Termintreue* ist, die von einer geringen *Durchlaufzeit* unmittelbar positiv beeinflusst wird (vgl. Abschnitt 2.3.2), werden diese beiden logistischen Zielgrößen als *quantitative Verteilungskriterien* definiert. Um die betriebsorganisatorischen Eigenschaften und Unterschiede zwischen den Produktionsmodulen zu berücksichtigen, wird zudem der *Freiheitsgrad* als *qualitatives Verteilungskriterium* ausgewählt. Der Freiheitsgrad adressiert an dieser Stelle die modulspezifische Materialflusskomplexität (vgl. Abschnitt 2.2.5) und die Mitarbeiterflexibilität bezüglich der Zuteilung auf die Arbeitssysteme im Produktionsmodul. Diese sind sehr stark von dem vorliegenden Fertigungsprinzip abhängig, wobei der Freiheitsgrad in einem nach dem Fließprinzip organisierten Produktionsmodul wesentlich geringer einzuschätzen ist als in einem nach dem Verrichtungsprinzip organisierten (vgl. Abschnitt 2.2.3).

Der methodische Ablauf der intermodularen Schlupfzeitverteilung gliedert sich in die nachfolgenden, gemäß ENGELHARDT et al. (2014) erläuterten fünf Schritte (vgl. Abbildung 42):

1. Gewichtung der Verteilungskriterien
2. Berechnung der Gesamtschlupfzeit
3. Berechnung faktorbezogener Schlupfzeiten
4. Ausführung der Verteilungsmechanismen
5. Kumulierte Bestimmung der Modulschlupfzeit

Bei der *Gewichtung der Verteilungskriterien (1)* handelt es sich um die Verfahrensinitialisierung, die als vorbereitende Planungstätigkeit verstanden und bei der eigentliche Schlupfzeitverteilung im Rahmen des Produktionsablaufs nicht erneut ausgeführt wird. Hierbei werden drei Gewichtungsfaktoren für die zuvor eingeführten quantitativen und qualitativen Verteilungskriterien festgelegt, die als *Durchlaufzeitfaktor* f_{DZ} , *Termintreuefaktor* f_{TT} und *Freiheitsgradfaktor* f_{FG} bezeichnet werden. Es gilt:

$$f_{DZ} + f_{TT} + f_{FG} = 1 \quad (6)$$

$$\text{mit } \begin{aligned} 0 &\leq f_{DZ} \leq 1 \\ 0 &\leq f_{TT} \leq 1 \\ 0 &\leq f_{FG} \leq 1 \end{aligned}$$

Die Gewichtung erfolgt über einen Experten, der die Ausprägungen der Verteilungskriterien Durchlaufzeit, Termintreue und Freiheitsgrad bezüglich der instanziierten Produktionsmodule miteinander vergleicht. Je stärker die jeweiligen Ausprägungen zwischen den einzelnen Produktionsmodulen variieren, desto

8 Situationsbasierte Steuerungsverfahren

höher sollte der entsprechende Verteilungsfaktor gewichtet werden. Beispielsweise erscheint die Gewichtung $f_{DZ} = 0,8$, $f_{TT} = 0,1$ und $f_{FG} = 0,1$ in einer modularen Fließfertigung mit *starr*en Materialflüssen, einer nahezu *fixen* Zuteilung der Mitarbeiter auf die Arbeitssysteme (geringe freiheitsgradbezogene Varianz zwischen den Modulen) und einer *hohen* Termintreue je Produktionsmodul zwischen 95 % und 100 % (geringe termintreuebezogene Varianz zwischen den Modulen) sinnvoll, sofern die modulspezifischen *Durchlaufzeiten erheblich variieren*. Liegen ähnliche Durchlaufzeiten in den Produktionsmodulen vor, wäre eine triviale, gleichmäßige Gewichtung, wie etwa $f_{DZ} = 0,34$, $f_{TT} = 0,33$ und $f_{FG} = 0,33$, zu präferieren.

Das eigentliche Verfahren der intermodularen Schlupfzeitverteilung, die über das intelligente Produkt ereignisbasiert im Produktionsablauf ausgelöst wird, startet mit der situationsbasierten *Berechnung der Gesamtschlupfzeit* S_G (2). Diese erfolgt unter Berücksichtigung von Daten, die durch die betriebsparallele Leistungsanalyse des Steuerungsassistenzsystems (auftragspezifische mittlere Durchführungszeit $ZDF_{m,i,j}$ und Mindestübergangszeit $ZUE_{min,i,j}$) ermittelt und durch die Produktionsplanung (auftragspezifischer Plan-Endtermin TAE_{Plan}) bereitgestellt werden (vgl. Abschnitt 7.2.2.1).

Damit gilt für die situationsbasierte auftragspezifische Gesamtschlupfzeit S_G in Anlehnung an LÖDDING (2008) und ENGELHARDT et al. (2014):

$$S_G = TAE_{Plan} - TEP_{Ist} - \sum_{j=AktAVG}^{AnzAVG} ZDF_{m,j} - \sum_{j=AktAVG+1}^{AnzAVG} ZUE_{min,j} \quad (7)$$

mit	S_G	Gesamtschlupfzeit [BKT]
	TAE_{Plan}	Plan-Endtermin des Auftrags [BKT]
	TEP_{Ist}	Ereigniszeitpunkt [BKT]
	$ZDF_{m,i,j}$	mittlere Durchführungszeit des j-ten Arbeitsvorgangs eines Auftrags i [BKT]
	$ZUE_{min,i,j}$	mittlere Mindestübergangszeit des j-ten Arbeitsvorgangs eines Auftrags i [BKT]
	$AktAVG$	Index des aktuellen Arbeitsvorgangs [-]
	$AnzAVG$	Anzahl der Arbeitsvorgänge des Auftrags [-]

In einem nächsten Schritt werden die *faktorbezogenen Schlupfzeiten* S_{DZ} , S_{TT} und S_{FG} (3) bestimmt, wofür auf die initial ermittelten Gewichtungsfaktoren zurückgegriffen wird. Es gilt:

$$S_{DZ} = f_{DZ} \cdot S_G \quad (8)$$

$$S_{TT} = f_{TT} \cdot S_G \quad (9)$$

$$S_{FG} = f_{FG} \cdot S_G \quad (10)$$

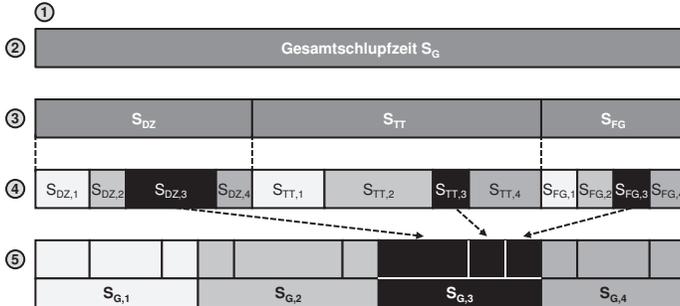
$$S_G = S_{DZ} + S_{TT} + S_{FG} \quad (11)$$

- mit f_{DZ} Durchlaufzeitfaktor [-]
 f_{TT} Termintreuefaktor [-]
 f_{FG} Freiheitsgradfaktor [-]
 S_G Gesamtschlupfzeit [BKT]
 S_{DZ} durchlaufzeitbezogene Schlupfzeit [BKT]
 S_{TT} termintreuebezogene Schlupfzeit [BKT]
 S_{FG} freiheitsgradbezogene Schlupfzeit [BKT]

Die anschließende Verteilung der faktorbezogenen Schlupfzeiten auf die Produktionsmodule erfolgt über die *Ausführung sogenannter Verteilungsmechanismen* (4), die in den nachfolgenden Abschnitten ausführlich beschrieben werden. Ergebnis dieser Mechanismen sind die faktorbezogenen Modulschlupfzeiten, d. h. modulspezifische Anteile an den faktorbezogenen Schlupfzeiten. Diese werden im Rahmen der *kumulierten Bestimmung der Modulschlupfzeit* $S_{G,k}$ (5) für jedes Produktionsmodul PM_k addiert, auf Basis derer die Sequenzierung erfolgt:

$$S_{G,k} = S_{DZ,k} + S_{TT,k} + S_{FG,k} \quad (12)$$

- mit $S_{G,k}$ Modulschlupfzeit des Moduls PM_k [BKT]
 $S_{DZ,k}$ durchlaufzeitbezogene Modulschlupfzeit des Moduls PM_k [BKT]
 $S_{TT,k}$ termintreuebezogene Modulschlupfzeit des Moduls PM_k [BKT]
 $S_{FG,k}$ freiheitsgradbezogene Modulschlupfzeit des Moduls PM_k [BKT]



Legende:

- | | |
|---|--|
| <p>① Gewichtung der Verteilungsfaktoren (Verfahrensinitialisierung)</p> <p>③ Berechnung faktorbezogener Schlupfzeiten</p> <p>⑤ Kumulierte Bestimmung der Modulschlupfzeit</p> | <p>② Berechnung der Gesamtschlupfzeit</p> <p>④ Ausführung der Verteilungsmechanismen</p> <p>PM_k: Produktionsmodul k</p> <p>S_G: Gesamtschlupfzeit</p> <p>$S_{G,k}$: Modulschlupfzeit von PM_k</p> <p>S_{DZ}, S_{TT}, S_{FG}: durchlaufzeit-, termintreue-, bzw. freiheitsgradbezogene Schlupfzeit</p> <p>$S_{DZ,k}, S_{TT,k}, S_{FG,k}$: durchlaufzeit-, termintreue-, bzw. freiheitsgradbezogene Modulschlupfzeit von PM_k</p> |
|---|--|

Abbildung 42: Schematischer Ablauf der intermodularen Schlupfzeitverteilung (ENGELHARDT et al. 2014)

8.3.3.2 Durchlaufzeitbezogener Verteilungsmechanismus

Die Verteilung der durchlaufzeitbezogenen Schlupfzeit S_{DZ} erfolgt mit Hilfe des in ENGELHARDT et al. (2014) dargestellten, durchlaufzeitbezogenen Verteilungsmechanismus. Dieser basiert auf der These, dass einem Produktionsmodul ein umso größerer Anteil an der Gesamtschlupfzeit eines Produktionsauftrags zusteht, je größer dessen Anteil an der gesamten Durchlaufzeit für die noch ausstehenden Arbeitsvorgänge ist. Für den durchlaufzeitbezogenen *Verteilungsfaktor* $v_{DZ,k}$ eines Auftrags bezüglich Produktionsmodul PM_k gilt damit:

$$v_{DZ,k} = \frac{ZDL_{m,i,k}}{ZDL_{m,i,Rest}} = \frac{ZDF_{m,i,k} + ZUE_{m,i,k}}{ZDL_{m,i,Rest}} \quad (13)$$

mit $\sum_k v_{DZ,k} = 1$

$v_{DZ,k}$	durchlaufzeitbezogener Verteilungsfaktor zu Modul PM_k [-]
$ZDL_{m,i,Rest}$	mittlere Restdurchlaufzeit v. Auftrag i für die noch zu durchlaufenden Produktionsmodule einschließlich PM_k [BKT]
$ZDL_{m,i,k}$	mittlere Durchlaufzeit v. Auftrag i im Modul PM_k [BKT]
$ZDF_{m,i,k}$	mittlere Durchführungszeit v. Auftrag i im Modul PM_k [BKT]
$ZUE_{m,i,k}$	mittlere Übergangszeit v. Auftrag i im Modul PM_k [BKT]

Dem Steuerungsassistenzsystem, das den Verteilungsfaktor situationsbasiert bestimmt, stehen die dargestellten auftragsspezifischen Daten über die betriebsparallele Leistungsanalyse (vgl. Abschnitt 7.2.2.1) zur Verfügung. Der berechnete Verteilungsfaktor ist notwendig, um den Anteil an der durchlaufzeitbezogenen Schlupfzeit S_{DZ} eines Auftrags zu bestimmen, der dem relevanten Produktionsmodul zusteht. Für diese *durchlaufzeitbezogene Modulschlupfzeit* $S_{DZ,k}$ gilt:

$$S_{DZ,k} = v_{DZ,k} \cdot S_{DZ} \quad (14)$$

mit $S_{DZ,k}$	durchlaufzeitbezogene Modulschlupfzeit [BKT]
$v_{DZ,k}$	durchlaufzeitbezogener Verteilungsfaktor zu Modul PM_k [-]
S_{DZ}	durchlaufzeitbezogene Schlupfzeit [BKT]

8.3.3.3 Termintreuebezogener Verteilungsmechanismus

Der vorliegende Verteilungsmechanismus dient gemäß ENGELHARDT et al. (2014) zur modulatorientierten Verteilung der termintreuebezogenen Schlupfzeit S_{TT} . Er basiert auf der Grundannahme, dass diejenigen Produktionsmodule, deren spezifische Modultermintreue TT_k größer ist als die Durchschnittstermintreue TT , jeweils einen gewissen Anteil der ihnen zustehenden Schlupfzeit an Produktionsmodule abgeben können, deren Termintreue geringer ist als die Durchschnittstermintreue. Durch diese „solidarische“ Umverteilung der Schlupfzeit soll die Durchschnittstermintreue gesteigert werden. Produktionsmodule mit einer unterdurchschnittlichen Modultermintreue sollen durch zusätzlichen

Schlupf dazu befähigt werden, etwaige Verzögerungen im Produktionsablauf besser ausgleichen zu können. Der Zusammenhang zwischen der Modultermintreue und der Durchschnittstermintreue lässt sich folgendermaßen beschreiben:

$$TT = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k|PM_k \in MM} TT_k \quad (15)$$

mit	TT	Durchschnittstermintreue [%]
	TT _k	Modultermintreue von Modul PM _k [%]
	PM _k	Produktionsmodul k
	n	auftragsbezogene Anzahl noch zu durchlaufender Module [-]
	MM	Menge der bis zur Fertigstellung eines Auftrags noch zu durchlaufenden n Module

Die modulspezifische Termintreue wird dem Steuerungsassistenzsystem bei der Ausführung des vorliegenden Verteilungsmechanismus von dessen betriebsparalleler Leistungsanalyse situationsbasiert bereitgestellt. Um den Verteilungsmechanismus zu initialisieren, erhält jedes der n Produktionsmodule PM_k, die der jeweilige Produktionsauftrag bis zu seiner Fertigstellung noch zu durchlaufen hat, einen identischen Anteil der termintreuebezogenen Schlupfzeit S_{TT}. Darüber hinaus werden diese n Produktionsmodule in zwei Modulumengen MM⁺ und MM⁻ aufgeteilt, in Abhängigkeit dessen, ob ein Produktionsmodul eine über- oder unterdurchschnittliche Termintreue aufweist. Es gilt:

$$S_{TT,start} = \frac{1}{n} \cdot S_{TT} \quad (16)$$

$$MM^+ := \{PM_k \in MM \mid TT_k \geq TT\} \quad (17)$$

$$MM^- := \{PM_k \in MM \mid TT_k < TT\} = MM \setminus MM^+ \quad (18)$$

mit	S _{TT,start}	initiale termintreuebezogene Modulschlupfzeit [BKT]
	S _{TT}	termintreuebezogene Schlupfzeit [BKT]
	n	auftragsbezogene Anzahl noch zu durchlaufender Module [-]
	MM	Menge der bis zur Fertigstellung eines Auftrags noch zu durchlaufenden n Module
	MM ⁺	Menge der Module mit überdurchschnittlicher Modultermintreue
	MM ⁻	Menge der Module mit unterdurchschnittlicher Modultermintreue
	PM _k	Produktionsmodul k
	TT _k	Modultermintreue von Modul k [%]
	TT	Durchschnittstermintreue [%]

Auf die Initialisierung folgt die Bestimmung der termintreuebezogenen Abgabefaktoren a_{TT,k} für alle zu MM⁺ zählenden Produktionsmodule. Dieser Abgabefaktor beschreibt den Anteil der initialen termintreuebezogenen Modulschlupfzeit

8 Situationsbasierte Steuerungsverfahren

$S_{TT,Start}$, die ein Produktionsmodul $PM_k \in MM^+$ abzugeben hat. Der Abgabefaktor setzt auf der Annahme auf, dass ein Produktionsmodul PM_k , welches über die maximale Termintreue von 100 % verfügt, keinen Bedarf an zusätzlichem Schlupf über diesen termintreuebezogenen Verteilungsmechanismus hat und somit seinen Schlupfzeitanteil $S_{TT,Start}$ vollständig abgeben kann. Ein Produktionsmodul PM_k , dessen Modultermintreue TT_k der Durchschnittstermintreue TT entspricht, gibt weder einen Anteil seiner initialen termintreuebezogenen Modulschlupfzeit $S_{TT,Start}$ ab noch erhält es zusätzlichen Schlupf im Zuge dieses Verteilungsmechanismus. Darüber hinaus berücksichtigt der Abgabefaktor über den Progressionsgrad $k_a \geq 1$, dass Produktionsmodule, deren Modultermintreue verhältnismäßig nahe an der Durchschnittstermintreue liegt, einen relativ geringen Anteil abgeben. Aus diesem Grund wird dieser Progressionsgrad anwendungsfallsspezifisch parametrisiert. Abbildung 43 verdeutlicht den Funktionsverlauf des termintreuebezogenen Abgabefaktors. Es gilt:

$$a_{TT,k} = \left(\frac{TT_k - TT}{100\% - TT} \right)^{k_a} \quad (19)$$

mit $k_a \geq 1$

$TT_k \geq TT$

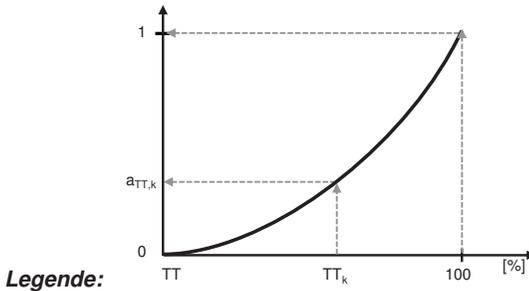
$a_{TT,k} \in [0, 1]$

$a_{TT,k}$ termintreuebezogener Abgabefaktor zu Modul PM_k [-]

k_a abgabefaktorbezogener Progressionsgrad [-]

TT_k Modultermintreue von Modul $PM_k \in MM^+$ [%]

TT Durchschnittstermintreue [%]



Legende:

TT : Durchschnittstermintreue TT_k : Modultermintreue von PM_k mit $TT \leq TT_k$
 PM_k Produktionsmodul k $a_{TT,k}$: Termintreuebezogener Abgabefaktor von PM_k

Abbildung 43: Funktionsverlauf des termintreuebezogenen Abgabefaktors
 (ENGELHARDT et al. 2014)

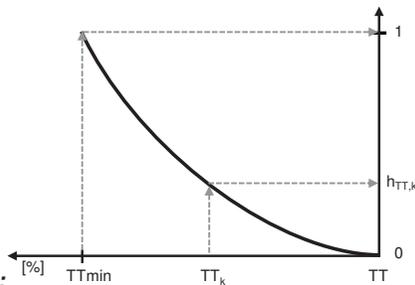
Nach der Bestimmung der termintreuebezogenen Abgabefaktoren $a_{TT,k}$ für jedes Produktionsmodul $PM_k \in MM^+$ erfolgt die Berechnung der von diesen Produktionsmodulen insgesamt abzugebenden termintreuebezogenen Schlupfzeit $S_{TT,a}$.

Diese entspricht der an die Produktionsmodule $PM_k \in MM^-$ zu verteilenden Schlupfzeit $S_{TT,v}$. Hierfür gilt:

$$S_{TT,a} = \sum_{k|PM_k \in MM^+} a_{TT,k} \cdot S_{TT,start} = S_{TT,v} \quad (20)$$

mit $S_{TT,a}$ termintreuebezogene Abgabeschlupfzeit [BKT]
 $S_{TT,v}$ termintreuebezogene Verteilschlupfzeit [BKT]
 $a_{TT,k}$ termintreuebezogener Abgabefaktor zu Modul PM_k [-]
 $S_{TT,start}$ initiale termintreuebezogene Modulschlupfzeit [BKT]
 k Index eines Produktionsmoduls $PM_k \in MM^+ [-]$

Um die termintreuebezogene Verteilschlupfzeit $S_{TT,v}$ auf die relevanten Produktionsmodule $PM_k \in MM^-$ zu verteilen, werden in einem nächsten Schritt die termintreuebezogenen Verteilungsfaktoren $v_{TT,k}$ für jedes dieser Produktionsmodule bestimmt. Hierfür wird zunächst ein Hilfsfaktor $h_{TT,k}$ bestimmt, dessen Funktionsverlauf (vgl. Abbildung 44) dem des termintreuebezogenen Abgabefaktors ähnelt.



Legende:

TT: Durchschnittstermintreue TT_k : Modultermintreue von PM_k mit $TT > TT_k$
 PM_k Produktionsmodul k TT_{min} : Minimale vorhandene Modultermintreue
 $h_{TT,k}$: Termintreuebezogener Hilfsfaktor von PM_k

Abbildung 44: Funktionsverlauf des termintreuebezogenen Hilfsfaktors

Für den vorliegenden modulspezifischen Hilfs- bzw. Verteilungsfaktor gilt die Annahme, dass einem Produktionsmodul $PM_k \in MM^-$ umso mehr zusätzliche Schlupfzeit über den termintreuebezogenen Verteilungsmechanismus zusteht, je weiter dessen durchschnittliche Modultermintreue TT_k von der Durchschnittstermintreue TT abweicht. Dafür wird die minimale Modultermintreue bestimmt und ebenfalls ein anwendungsfallspezifisch zu parametrisierender Progressionsgrad $k_v \geq 1$ eingeführt, der dafür sorgt, dass Produktionsmodule, deren Modultermintreue verhältnismäßig nahe an der Durchschnittstermintreue liegt, einen relativ geringen termintreuebezogenen Schlupfzeitanteil erhalten. Es gilt:

$$h_{TT,k} = \left(\frac{TT - TT_k}{TT - TT_{\min}} \right)^{k_v} \quad (21)$$

mit

$k_v \geq 1$	
$TT_k < TT$	
$TT_{\min} := \min \{TT_k PM_k \in MM\}$	
$h_{TT,k}$	termintreuebezogener Hilfsfaktor zu Modul PM_k [-]
k_v	verteilungsbezogener Progressionsgrad [-]
TT_k	Modultermintreue von Modul $PM_k \in MM$ [%]
TT	Durchschnittstermintreue [%]

Zur Bestimmung des termintreuebezogenen Verteilungsfaktors ist es erforderlich, die entsprechenden Hilfsfaktoren so auf das Intervall $[0, 1]$ zu normieren, dass deren Summe 1 ergibt:

$$v_{TT,k} = \frac{h_{TT,k}}{\sum_{k|PM_k \in MM} h_{TT,k}} \quad (22)$$

mit

$\sum_{k PM_k \in MM} v_{TT,k} = 1,$	
$h_{TT,k}$	termintreuebezogener Hilfsfaktor zu Modul $PM_k \in MM$ [-]
$v_{TT,k}$	termintreuebezogener Verteilungsfaktor zu Modul PM_k [-]

Für die *termintreuebezogene Modulschlupfzeit* $S_{TT,k}$ gilt somit:

$$S_{TT,k} = \begin{cases} S_{TT,start} - a_{TT,k} \cdot S_{TT,start}, & \forall k | PM_k \in MM^+ \\ S_{TT,start} + v_{TT,k} \cdot S_{TT,v}, & \forall k | PM_k \in MM^- \end{cases} \quad (23)$$

mit

$S_{TT,k}$	termintreuebezogene Modulschlupfzeit für PM_k [BKT]
$S_{TT,start}$	initiale termintreuebezogene Modulschlupfzeit [BKT]
$S_{TT,v}$	termintreuebezogene Verteilschlupfzeit [BKT]
$a_{TT,k}$	termintreuebezogener Abgabefaktor von Modul PM_k [-]
$v_{TT,k}$	termintreuebezogener Verteilungsfaktor von Modul PM_k [-]

8.3.3.4 Freiheitsgradbezogener Verteilungsmechanismus

Die Verteilung der freiheitsgradbezogenen Schlupfzeit S_{FG} erfolgt nach ENGELHARDT et al. (2014) auf Basis des freiheitsgradbezogenen Verteilungsmechanismus. Dieser verfolgt das Ziel, Produktionsmodulen in Abhängigkeit der Materialflusskomplexität (MK_k) einerseits und der Mitarbeiterflexibilität (MF_k) andererseits zusätzlichen Schlupf zuzuschreiben. Die Mitarbeiterflexibilität adressiert dabei die Häufigkeit, mit der Mitarbeiter im Produktionsmodul zwischen den einzelnen Arbeitssystemen wechseln. Da es sich bei dem Freiheitsgrad um ein qualitatives Verteilungskriterium handelt, muss die Bestimmung des freiheitsgradbezogenen Verteilungsfaktor $v_{FG,k}$ eines Produktionsmoduls PM_k im paarweisen Vergleich zu den anderen Produktionsmodulen erfolgen. Dieser qualitative Vergleich der Produktionsmodule wird initial, analog der Gewichtung der

8.3 Situationsbasierte Reihenfolgebildung

Verteilungskriterien, im Rahmen der vorbereitenden Planung vorgenommen und bei der eigentliche Schlupfzeitverteilung im Rahmen des Produktionsablaufs nicht erneut ausgeführt. Hierzu wird eine quadratische *Modulvergleichsmatrix* (vgl. Tabelle 7) eingesetzt, in deren m Zeilen und m Spalten sämtliche Produktionsmodule chronologisch aufgetragen werden. Die Zellen der Matrix enthalten dabei den *paarweisen Modulvergleichswert* MVW_{kl} . Die Bestimmung dieses Wertes erfolgt jeweils durch einen Experten im Rahmen des qualitativen Modulvergleichs hinsichtlich der Kriterien Materialflusskomplexität und Mitarbeiterflexibilität. Sofern ein Produktionsmodul PM_k über einen höheren Freiheitsgrad, d. h. eine höhere Materialflusskomplexität ($MK_k > MK_l$) und Mitarbeiterflexibilität ($MF_k > MF_l$), verfügt als das mit diesem im Vergleich stehende Modul PM_l , enthält die entsprechende Zelle den Modulvergleichswert $MVW_{kl} = 2$. Im Falle eines gleichen oder ähnlichen Freiheitsgrads liegt dieser Wert bei $MVW_{kl} = 1$. Weist das Produktionsmodul PM_k eine geringere Materialflusskomplexität ($MK_k < MK_l$) sowie Mitarbeiterflexibilität ($MF_k < MF_l$) auf als das Modul PM_l , so liegt der relevante Modulvergleichswert bei $MVW_{kl} = 0$. Es gilt somit:

$$MVW_{kl} = \begin{cases} 2, & \text{wenn } MK_k > MK_l \wedge MF_k > MF_l \\ 1, & \text{wenn } MK_k \leq MK_l \wedge MF_k \geq MF_l \\ 1, & \text{wenn } MK_k \geq MK_l \wedge MF_k \leq MF_l \\ 0, & \text{wenn } MK_k < MK_l \wedge MF_k < MF_l \end{cases} \quad (24)$$

mit MVW_{kl} Modulvergleichswert von PM_k zu PM_l [-]
 MK_k, MK_l Materialflusskomplexität von PM_k bzw. PM_l [-]
 MF_k, MF_l Mitarbeiterflexibilität von PM_k bzw. PM_l [-]

Tabelle 7: Beispielhafte Modulvergleichsmatrix

MVW_{kl}	PM_1	PM_2	PM_3	PM_4	PM_5	Summe	$v_{FG,k}$
PM_1		1	1	2	2	6	0,3
PM_2	1		1	2	2	6	0,3
PM_3	1	1		2	2	6	0,3
PM_4	0	0	0		1	1	0,05
PM_5	0	0	0	1		1	0,05
					Total	20	1

Legende:

MVW_{kl} : Modulvergleichswert von PM_k zu PM_l
 PM_k : Produktionsmodul k
 $v_{FG,k}$: freiheitsgradbezogener Verteilungsfaktor vom PM_k

Das Steuerungsassistenzsystem greift bei der Bestimmung des *freiheitsgradbezogenen Verteilungsfaktors* $v_{FG,k}$ auf die Modulvergleichsmatrix zu und bestimmt diesen in Abhängigkeit der für die Fertigstellung eines Auftrags noch relevanten n Produktionsmodule der Modulmenge MM unter Berechnung der entsprechenden Zeilensummen (vgl. Tabelle 7). Es gilt:

$$v_{FG,k} = \frac{\sum_{l|PM_l \in MM}^m MVW_{kl}}{\sum_{k|PM_k \in MM}^m \sum_{l|PM_l \in MM}^m MVW_{kl}} \quad (25)$$

mit $\sum_k v_{FG,k} = 1$,
 $v_{FG,k}$ freiheitsgradbezogener Verteilungsfaktor zu Modul PM_k [-]
MM Menge der bis zur Fertigstellung eines Auftrags noch
 zu durchlaufenden n Module
 MVW_{kl} Modulvergleichswert von PM_k zu PM_l [-]

Dieser Verteilungsfaktor wird eingesetzt, um den Anteil an der freiheitsgradbezogenen Schlupfzeit S_{FG} eines Auftrags zu bestimmen, der dem relevanten Produktionsmodul PM_k zusteht. Für diese *freiheitsgradbezogene Modulschlupfzeit* $S_{FG,k}$ gilt:

$$S_{FG,k} = v_{FG,k} \cdot S_{FG} \quad (26)$$

mit $S_{FG,k}$ freiheitsgradbezogene Modulschlupfzeit [BKT]
 $v_{FG,k}$ freiheitsgradbezogener Verteilungsfaktor zu Modul PM_k [-]
 S_{FG} freiheitsgradbezogene Schlupfzeit [BKT]

8.4 Intramodulare Rückstandsregelung

8.4.1 Allgemeines

Die intramodulare Rückstandsregelung verfolgt das Ziel, aktuelle Rückstände bzw. Planabweichungen im Produktionsablauf zu identifizieren und diese mit adäquaten Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität (z. B. Überstunden) zu beseitigen, um eine möglichst hohe Termintreue zu gewährleisten (vgl. Abschnitt 4.2.2.3). Die Motivation für das vorliegende Steuerungsverfahren stützt sich auf die Studie des VDMA e. V., des FIR e. V. und des WZL der RWTH Aachen, wonach 60 % der befragten Unternehmen eine ungleichmäßige Kapazitätsauslastung als ein wesentliches Defizit der PPS erachten (SCHUH & STICH 2011). Darüber hinaus wird nach LÖDDING (2008) die Kapazitätssteuerung und im Speziellen die Rückstandsregelung in den meisten Unternehmen nur mangelhaft durchgeführt, was u. a. aus einer unzureichenden Informationstransparenz bezüglich des aktuellen Auftragsrückstands bzw. ineffizienten Werkzeugen zur Rückstandsmessung folgt. Mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagement und der damit verbundenen Möglichkeit, in der steuerungorientiert modularisierten Produktion eine betriebsparallele Leistungsanalyse und Echtzeit-Auftragsüberwachung (vgl. Abschnitt 7.2.2.1) umzusetzen, kann dieser Mangel überwunden werden. Das Steuerungsassistenzsystem stellt dem SAS-Mitarbeiterdialog die notwendigen Basisinformationen, v. a. den aktuellen mo-

dulbezogenen Auftragsrückstand, zur Verfügung, um eine intramodulare Rückstandsregelung auf der dezentralen Modulebene zu implementieren.

8.4.2 Verfahren der intramodularen Rückstandsregelung

8.4.2.1 Situationsbasierte Rückstandsmessung

Durch die Identifikation jeglicher Produktionsaufträge zu Beginn und nach der Bearbeitung der intelligenten Produkte in einem Produktionsmodul kann der aktuelle modulbezogene Auftragsrückstand mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagement situationsbasiert bestimmt werden. Die generierten produktspezifischen Ereignisse werden dabei vom Ereignisverwaltungssystem gespeichert und dem Steuerungsassistenzsystem über den Pull-Modus regelmäßig zur Verfügung gestellt. Auf dieser Basis ist dieses zentrale Steuerungselement in der Lage, den aktuellen modulbezogenen *Ist-Abgang* $AB_{Ist,k}(t)$ betriebsparallel zu berechnen. Unter dem Ist-Abgang eines Produktionsmoduls zu einem bestimmten Zeitpunkt t wird dabei der Betrag der bis dahin geleisteten Arbeit in Vorgabestunden verstanden. Da zudem der Plan-Abgang $AB_{Plan}(t)$ seitens der Produktionsplanung zur Verfügung steht, aus dem mit Hilfe modulspezifischer Plan-Endtermine der *modulspezifische Plan-Abgang* $AB_{Plan,k}(t)$ bestimmt wird, erfolgt die *situationsbasierte Rückstandsmessung* ebenfalls im Steuerungsassistenzsystem. In Anlehnung an LÖDDING (2008) gilt für den *aktuellen Modulrückstand* $RS_k(t)$ zum Zeitpunkt t im Produktionsmodul PM_k :

$$RS_k(t) = AB_{Plan,k}(t) - AB_{Ist,k}(t) \quad (27)$$

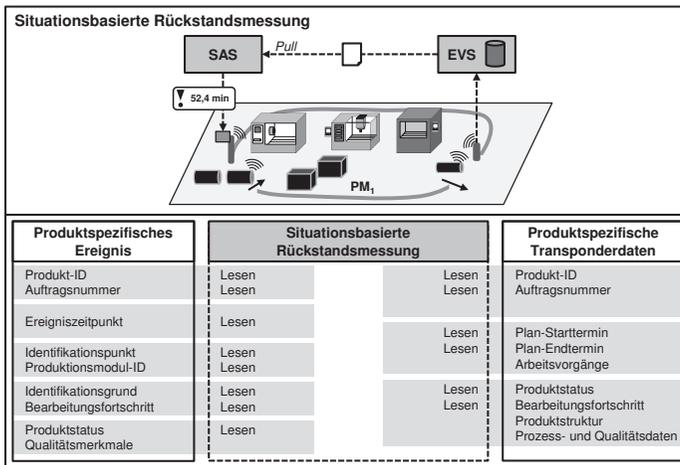
mit	$RS_k(t)$	Modulrückstand im Produktionsmodul PM_k [min]
	$AB_{Plan,k}(t)$	Plan-Abgang von Produktionsmodul PM_k [min]
	$AB_{Ist,k}(t)$	Ist-Abgang von Produktionsmodul PM_k [min]

Die situationsbasierte Rückstandsmessung kann mit Hilfe der in LÖDDING (2008) eingeführten Kriterien folgendermaßen klassifiziert werden. Da die Rückstandsmessung im Rahmen dieses intramodularen Steuerungsverfahrens modulspezifisch erfolgt, weist diese, im Vergleich zu einer Messung des Rückstands auf Produktions- (grober Detaillierungsgrad) oder Arbeitssystemebene (feiner Detaillierungsgrad), einen *mittleren Detaillierungsgrad* auf. Hierdurch wird gleichzeitig eine *hohe Messgenauigkeit* erreicht, denn die Rückstandsmessung auf Modulebene erfolgt betriebsparallel, sodass die bereits geleisteten Vorgabestunden eines auftragspezifischen Arbeitsvorrats anteilig berücksichtigt werden. Als sogenanntes Messmittel wird das RFID-basierte hybride Informationsmanagement eingesetzt, welches unter Einsatz seiner zentralen und dezentralen Steuerungselemente eine elektronische Betriebsdatenerfassung mit einer *hohen Informationsgenauigkeit* ermöglicht. Als Messgröße wird, wie bereits eingeführt, der

8 Situationsbasierte Steuerungsverfahren

modulspezifische *Ist-Abgang* $AB_{Ist,k}(t)$ verwendet, aus dem im Vergleich mit dem Plan-Abgang der aktuelle modulspezifische Rückstand bestimmt wird.

Abbildung 45 zeigt das Prinzip der situationsbasierten Rückstandsmessung, welche mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements und der dargestellten Ereignis- und Transponderdaten ausgeführt wird. Der berechnete modulspezifische Rückstand wird unmittelbar an den jeweiligen SAS-Mitarbeiterdialog weitergeleitet (vgl. Abschnitt 7.2.2.1), um die eigentliche Rückstandsregelung mittels einer *Ad-hoc-Kapazitätsanpassung* (vgl. Abschnitt 8.4.2.2) intramodular umzusetzen.



Legende:

SAS: Steuerungssystem Hauptkomponente Nebenkomponente Ereignisinformation
 EVS: Ereignisverwaltungssystem Steuerungsfloss Materialfluss
 PM₁: Produktionsmodul „Kleine Zerspanung“ Aktueller Rückstand

Abbildung 45: Situationsbasierte Rückstandsmessung

8.4.2.2 Ad-hoc-Kapazitätsanpassung

Die Ad-hoc-Kapazitätsanpassung wird durch den SAS-Mitarbeiterdialog abgebildet und mit Hilfe einer *ereignisorientierten Auslösungslogik* situationsbezogen implementiert. Gemäß LÖDDING (2008) reagiert eine Kapazitätsanpassung mit dieser Auslösungslogik und der leistungsfähigen situationsbasierten Rückstandsmessung (vgl. Abschnitt 8.4.2.1) schneller auf einen Rückstand als eine Kapazitätsanpassung mit periodischer Auslösungslogik. Die ereignisorientierte Auslösungslogik sorgt für eine unmittelbare Kapazitätsanpassung, sobald ein zuvor definierter modulspezifischer *Grenzübergang* $RS_{Grenz,k}$ durch den aktuellen Rück-

stand im Produktionsmodul $RS_k(t)$ überschritten wird. Als Auslösungsbedingung gilt damit in Anlehnung an LÖDDING (2008):

$$RS_k(t) > RS_{Grenz,k} \quad (28)$$

mit $RS_k(t)$ Modulrückstand im Produktionsmodul PM_k [min]
 $RS_{Grenz,k}$ Grenzurückstand von Produktionsmodul PM_k [min]

Sofern der Grenzurückstand überschritten ist, stehen im Rahmen der Rückstandsregelung verschiedene Möglichkeiten zur Kapazitätsanpassung zur Verfügung, die über den SAS-Mitarbeiterdialog intuitiv kommuniziert werden (vgl. Abschnitt 7.2.3.1). Diese werden für jedes Produktionsmodul im konkreten Anwendungsfall definiert und hängen unmittelbar von der in einem steuerungsorientiert instanziierten Produktionsmodul verfügbaren *Modulflexibilität* ab (vgl. Abschnitt 6.4.4). Diese ergibt sich aus der Kapazitätsflexibilität der Mitarbeiter und der Betriebsmittel, wobei für die intramodulare Rückstandsregelung insbesondere diejenigen Möglichkeiten nach LÖDDING (2008) relevant sind, die eine *kurzfristige* Ad-hoc-Kapazitätsanpassung zulassen.

Auf Seiten der Betriebsmittelflexibilität zählt hierzu die *Veränderung der Betriebsmittelintensität*, worunter die Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit eines Betriebsmittels verstanden wird. Dabei wird der Betriebspunkt von einem optimalen Betriebspunkt kurzfristig in Richtung eines kapazitätsmaximalen Betriebspunktes verschoben. Diese Möglichkeit ist in der Praxis jedoch häufig sehr begrenzt. Darüber hinaus kann das *Verschieben von Wartungsarbeiten* auf einen späteren Zeitpunkt geringeren Kapazitätsbedarfs helfen, Rückstand abzubauen, indem die Betriebszeit einer Maschine ausschließlich zur Produktion eingesetzt wird. Jedoch handelt es sich hierbei um eine risikoreiche Strategie, da, sobald ein Wartungsbedarf für eine Maschine besteht, eine erhöhte Störungswahrscheinlichkeit besteht. Die *Verlagerung auf alternative Betriebsmittel* entspricht dem Konzept der dezentralen Selbstoptimierung innerhalb des Produktionsmoduls. Über die Kommunikation alternativer Arbeitssysteme für einen auftragsspezifischen Arbeitsvorgang, kann dieser auf Betriebsmittel umgelagert werden, die aktuell nicht vollständig ausgelastet sind.

Unter den Möglichkeiten, die aktuelle Modulkapazität über die Mitarbeiter anzupassen, sind für die intramodulare Rückstandsregelung insbesondere die *Arbeitszeitflexibilität* und die *Mehrfachqualifizierung* relevant. Im Rahmen der *Arbeitszeitflexibilität* lässt sich die Standardarbeitszeit im Falle eines modulbezogenen Rückstands spontan über Überstunden und Zusatzschichten (z. B. Wochenendschichten) erhöhen. Die *Arbeitszeitflexibilität* kann als umso höher bezeichnet werden, je schneller die Reaktion und je geringer die damit verbundenen Kosten sind. Die *Mehrfachqualifizierung* verfolgt das Ziel, dass möglichst viele Modulmitarbeiter die Auftragsbearbeitung an möglichst vielen Betriebsmitteln innerhalb eines Produktionsmoduls beherrschen und die Mitarbeiter dadurch flexibel

8 Situationsbasierte Steuerungsverfahren

eingesetzt werden können. So besteht die Möglichkeit, Bedarfsschwanken kurzfristig dadurch auszugleichen, dass besonders nachgefragte Arbeitssysteme mitarbeiterseitig bei maximaler Kapazität betrieben werden. Ein geeignetes Werkzeug, um die Mehrfachqualifizierung innerhalb eines Produktionsmoduls aufzuzeigen, zu analysieren und etwaigen Qualifikationsbedarf abzuleiten, stellt die Modulqualifikationsmatrix dar (vgl. Tabelle 8).

Tabelle 8: Modulqualifikationsmatrix (LÖDDING 2008)

Mitarbeiter	Arbeitssysteme im PM ₁		
	Drehen	Fräsen	Schleifen
Müller	2	2	2
Maier	2	1	0
Schmidt	2	2	1
Hämmerle	3	3	3

Legende:

PM₁: Produktionsmodul 1

3: Mitarbeiter kann die Tätigkeit vollständig ausüben und andere darin ausbilden

2: Mitarbeiter kann die Tätigkeit vollständig ausüben

1: Mitarbeiter kann die Tätigkeit teilweise ausüben

0: Mitarbeiter kann die Tätigkeit nicht ausüben

Um eine quantitative Aussage über die Kapazitätsflexibilität eines Produktionsmoduls treffen zu können, wird, in Anlehnung an LÖDDING (2008), die *relative Modulkapazität* $KAP_{rel,k}$ zum Zeitpunkt t eines Produktionsmoduls PM_k , welches sich aus n Arbeitssystemen AS_i zusammensetzt, eingeführt. Sofern die relative Modulkapazität unterhalb 100 % liegt, kann die Plan-Leistung des Produktionsmoduls nur über eine dauerhafte Kapazitätserhöhung erreicht werden. Bei einem Wert oberhalb von 100 % liegen Auslastungsverluste im Produktionsmodul vor, die Potenzial zur Ad-hoc-Kapazitätsanpassung verdeutlichen. Es gilt:

$$KAP_{rel,k}(t) = \min \{KAP_{rel,k1}(t), \dots, KAP_{rel,ki}(t), \dots, KAP_{rel,kn}(t)\} \quad (29)$$

mit
$$KAP_{rel,ki}(t) = \frac{KAP_{ki}(t)}{BEL_{m,i}} \cdot 100$$

$$KAP_{ki}(t) = L_{ki}(t) = \min\{PKAP_{v,ki}(t), BKAP_{v,ki}(t)\}$$

$KAP_{rel,k}(t)$ relative Modulkapazität des Produktionsmodul PM_k [%]

$KAP_{rel,ki}(t)$ relative Kapazität des Arbeitssystems AS_i in PM_k [%]

$KAP_{ki}(t)$ Kapazität des Arbeitssystems AS_i in PM_k [Std/BKT]

$BEL_{m,i}$ mittlere Belastung des Arbeitssystems AS_i [Std/BKT]

$PKAP_{v,ki}(t)$ verfügbare Personalkapazität von AS_i in PM_k [Std/BKT]

$BKAP_{v,ki}(t)$ verfügbare Betriebsmittelkapazität von AS_i in PM_k [Std/BKT]

t aktueller Betrachtungszeitpunkt

8.5 Fazit

Die situationsbasierten Steuerungsverfahren wurden als drittes Element und gleichzeitig Kern des Systems zur situationsbasierten Produktionssteuerung in dem vorliegenden Kapitel entwickelt. Dieses Systemelement setzt dabei auf der betriebsorganisatorischen und informationstechnischen Basis auf, die durch die beiden Systemelemente steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung und RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement geschaffen wurde. Im nachfolgenden Kapitel 9 erfolgt die technische Umsetzung und Validierung des Systems zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung.

9 Technische Umsetzung und Validierung

9.1 Übersicht

Das System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung besteht aus den drei Systemelementen steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung, RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement und situationsbasierte Steuerungsverfahren. Das Ziel des vorliegenden Kapitels sind die Validierung sowie das Aufzeigen der technischen Umsetzbarkeit der einzelnen Systemelemente. In Abschnitt 9.2 wird hierzu die Umsetzung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements anhand eines Anwendungsbeispiels in der Automobilindustrie beschrieben. Diese Umsetzung wird durch die Implementierung von situationsbasierten Steuerungsverfahren unter Einsatz des kommerziellen Softwareproduktes *SAP Manufacturing Execution* ergänzt, das in eine produktionstechnische Versuchsanlage integriert wurde. Daraufaufgehend wird in Abschnitt 9.3 der Nutzen und die Leistungsfähigkeit des Steuerungssystems über eine simulationsbasierte Validierung und beispielhafte Anwendung der erarbeiteten Modularisierungsprinzipien dargestellt. Der Abschluss des Kapitels erfolgt mit Abschnitt 9.4, in dem eine anforderungsbezogene Bewertung und Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Steuerungssystems vorgenommen wird.

9.2 Technische Umsetzung

9.2.1 Umsetzung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements in der Automobilindustrie

9.2.1.1 Beschreibung des Umsetzungsszenarios

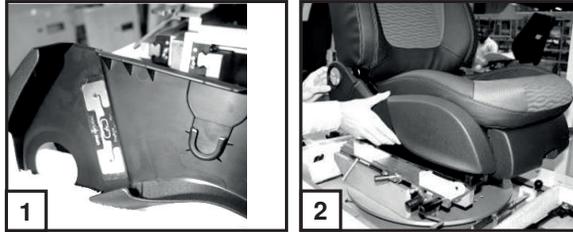
Innerhalb des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „RAN“ (RFID-based Automotive Network) konnte das RFID-basierte hybride Informationsmanagement prototypisch implementiert werden (REINHART et al. 2013d). Im Fokus dieses Szenarios stand die technische Umsetzbarkeit der Steuerungselemente intelligentes Produkt und Ereignisverwaltungssystem (vgl. Abschnitte 7.2.2.2 und 7.2.3.2) im Rahmen eines überbetrieblichen Produktionsszenarios mit einem Automobilzulieferer und einem Automobilhersteller. Darüber hinaus sollte der Aufgabenbereich RFID-basierte Betriebsdatenerfassung des SAS-Mitarbeiterdialogs (vgl. Abschnitt 7.2.3.1) und im Speziellen der Echtzeit-Informationsaustausch von Ereignis- und Transponderdaten im produktiven Umfeld getestet werden.

Der Automobilzulieferer stellt die Sitze für ein zu produzierendes Fahrzeug her und liefert diese in der geforderten Reihenfolge bedarfssynchron, im Sinne einer Just-in-Sequence-Produktion (JIS), an den Automobilhersteller. Hierfür sendet dieser täglich eine Vorschau an den Zulieferer mit den am folgenden Tag zu produzierenden Stückzahlen und individuellen Sitzspezifika. Diese Informationen werden genutzt, um im Rahmen der Produktionsplanung die Montageaufträge anzulegen und die Montagereihenfolge unter Berücksichtigung der jeweiligen Komplexität einer Fahrzeugsitzvariante zu definieren. Durch dieses Vorgehen wird gewährleistet, dass die Auslieferung der abgerufenen Fahrzeugsitze termintreu erfolgt und eine gleichmäßige Mitarbeiterauslastung in der getakteten Fließmontage des Fahrzeugsitzherstellers erzielt werden kann. Dieses Umsetzungsszenario weist die in Abschnitt 1.1 erläuterte hohe Steuerungskomplexität auf und eignet sich aus diesem Grund zur Umsetzung und Validierung der genannten Steuerungselemente.

Für die prototypische Umsetzung wurden zwei Produktionsmodule instanziiert, um die zur Abbildung des aktuellen Auftragsstatus und Produktzustands relevanten Ereignis- und Transponderdaten betriebsparallel generieren zu können. Das erste Produktionsmodul bildete die finale Montage- bzw. Qualitätssicherungsstation beim Fahrzeugsitzhersteller, während das zweite Produktionsmodul von der Montagestation beim Automobilhersteller repräsentiert wurde, an der der Verbau des Fahrzeugsitzes in das zugehörige Fahrzeug erfolgt. Die Tatsache, dass die beiden instanziierten Produktionsmodule Teile zweier unabhängiger Unternehmen sind, steigerte die Anforderungen an die Steuerungselemente in informationstechnischer Hinsicht sowie die Komplexität deren Umsetzung. Dennoch eigneten sich diese zur technischen Validierung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements.

Untersuchungsgegenstand war die Produktion von 50 Fahrzeugsitzen (rechter Vordersitz) sowie deren Verbau in das zugehörige Fahrzeug beim Automobilhersteller. In diesem Rahmen wurden die Steuerungselemente intelligentes Produkt und Ereignisverwaltungssystem sowie die RFID-basierte Betriebsdatenerfassung des SAS-Mitarbeiterdialogs, wie nachfolgend beschrieben, umgesetzt.

Die Fahrzeugsitze wurden jeweils mit einem RFID-Transponder ausgestattet, um als *intelligente Produkte* zu agieren. Bei dem Transponder handelte es sich um einen selbstklebenden UHF-Datenträger (vgl. Abschnitt 2.4.3) mit einer Kapazität zur Speicherung von Nutzdaten in Höhe von 64 Byte. Dieser wurde jeweils während der laufenden Produktion in eine Seitenblende des Fahrzeugsitzes eingeklebt (vgl. Abbildung 46).



Legende:

- 1: RFID-Transponder auf der Innenseite der Seitenblende
- 2: Montage der Seitenblende an den Fahrzeugsitz

Abbildung 46: Anbringung des RFID-Transponders am Fahrzeugsitz
(Fotos: REINHART et al. 2013d)

Auf dem RFID-Transponder des intelligenten Produktes wurden während des Produktionsablaufs, der in Abschnitt 7.2.4.3 eingeführten Datenstruktur folgend, sowohl organisatorische (z. B. Produkt-ID) als auch prozessuale (z. B. Drehmoment) steuerungsrelevante Produktinformationen gespeichert. Diese Daten wurden in Anlehnung an das SemProM-Datenformat formatiert, welches einen wahlfreien Zugriff auf den gespeicherten Produktzustand ermöglicht (vgl. Abschnitt 4.4.4).

Das zentrale Steuerungselement *Ereignisverwaltungssystem* mit seinen beiden Subsystemen EVS-Datenbank und EVS-Initialisierungsapplikation wurde durch den im Projekt „RAN“ entwickelten Infobroker abgebildet (vgl. Abschnitt 4.4.2). Dieser setzt auf den Empfehlungen des EPC Information Services (EPCIS) und damit dem GS1-STANDARD (2007) auf, weshalb die Aufgaben Ereignis-Initialisierung, Ereignis-Routing und Echtzeit-Produktionsabbildung (vgl. Abschnitt 7.2.2.2) gemäß der entwickelten Referenzarchitektur realisiert werden konnten.

Beide Produktionsmodule wurden jeweils mit den für ein RFID-System notwendigen Hardware- und Softwarekomponenten (UHF-Antenne, Schreib-/Lesegerät, RFID-Applikationssoftware etc.) ausgestattet, um die RFID-basierte Betriebsdatenerfassung, als Aufgabe des *SAS-Mitarbeiterdialogs*, und den Echtzeit-Informationsaustausch von Ereignis- und Transponderdaten validieren zu können.

Die nachfolgenden beiden Abschnitte 9.2.1.2 und 9.2.1.3 detaillieren den Aufbau und den Ablauf der beiden Produktionsmodule sowie die generierten Ereignis- und Transponderdaten zur Abbildung des aktuellen Auftragsstatus und Produktzustands.

9.2.1.2 Technische Umsetzung beim Fahrzeugsitzhersteller

Das Produktionsmodul beim Fahrzeugsitzhersteller umfasst die finale Montage- bzw. Qualitätssicherungsstation der getakteten Sitzmontage, die mit einem RFID-System ausgestattet wurde. Dieses wurde unter Einsatz einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS), die mit der Anlagensteuerung verknüpft war, gesteuert. Die relevanten Aufgaben des SAS-Mitarbeiter-dialogs wurden an dieser Station somit automatisiert ausgeführt.

In einem ersten Schritt wurde beim Eintreffen eines Fahrzeugsitzes bzw. Auftrags (Losgröße 1) im Produktionsmodul die Initialisierung des intelligenten Produktes vorgenommen. Hierzu wurde der Barcode auf dem an jedem Fahrzeugsitz angebrachten auftragspezifischen Produktionslabel gescannt, um einerseits die erforderlichen produktspezifischen Daten auszulesen. Andererseits wurde dadurch die Beschreibung des angebrachten RFID-Transponders unter Einsatz der installierten UHF-Antenne gestartet. Die vom Barcode ausgelesenen Daten wurden um weitere systemseitig bereitgestellte Informationen ergänzt, sodass als organisatorische Daten die *Produkt-ID* (Electronic Product Code EPC) sowie der *Ist-Endtermin* (UTC Zeitstempel) auf dem RFID-Transponder gespeichert werden konnten. Als prozessuale Daten wurden der *Produktstatus* (boolescher Ausdruck) und der *Bearbeitungsfortschritt* (Nummer der aktuellen Montagestation) auf dem intelligenten Produkt abgelegt.

Darüber hinaus wurde an diesem Produktionsmodul mit jedem fertiggestellten intelligenten Fahrzeugsitz ein produktspezifisches Ereignis generiert, das ad hoc an das Ereignisverwaltungssystem weitergeleitet werden konnte. Das Ereignis folgt dabei strukturell den in Abschnitt 7.2.4.2 formulierten Richtlinien zur Abbildung des Auftragsstatus. Es fasst bei der Identifikation eines intelligenten Fahrzeugsitzes (*Was?* – *Produkt-ID, Auftragsnummer*) auftrags- und produktspezifische Informationen über den Erfassungszeitpunkt (*Wann?* – *Ereigniszeitpunkt*), den Erfassungsort (*Wo?* – *Identifikationspunkt, Produktionsmodul-ID*) und den Erfassungsgrund (*Warum?* – *Identifikationsgrund, Bearbeitungsfortschritt*) in einer XML-basierten Datenstruktur zusammen.

9.2.1.3 Technische Umsetzung beim Automobilhersteller

Das zweite Produktionsmodul wird durch die Montagestation beim Automobilhersteller beschrieben, an der der Fahrzeugsitz in das zugehörige Fahrzeug im Rahmen einer getakteten Fließmontage verbaut wird. Das installierte RFID-System wurde dabei über eine Applikationssoftware, die als Anwendung des SAS-Mitarbeiterdialogs verstanden werden kann, ausgeführt.

Sobald ein intelligenter Fahrzeugsitz am Produktionsmodul eingetroffen ist, wurde dieser RFID-basiert über die gespeicherte Produkt-ID identifiziert und

eine Zuordnung zu dem relevanten Fahrzeug vorgenommen. Bei Zugang eines Sitzes zum Produktionsmodul wurde somit, der Ablauflogik in der steuerungsorientiert modularisierten Produktion folgend (vgl. Abschnitt 6.1), ausschließlich lesend auf den RFID-Transponder zugegriffen. Hierdurch wurde gleichzeitig ein produktspezifisches Ereignis generiert, das die Präsenz des Fahrzeugsitzes im Produktionsmodul ad hoc an das Ereignisverwaltungssystem kommuniziert hat. Dieses Ereignis entspricht in seinem Aufbau dem im ersten Produktionsmodul generierten und erfüllt somit ebenfalls die in Abschnitt 7.2.4.2 formulierten Vorgaben zur Abbildung des Auftragsstatus.

Nachdem die Montage des Sitzes im Fahrzeug erfolgreich abgeschlossen wurde, konnten die Informationen auf dem RFID-Transponder des intelligenten Fahrzeugsitzes unmittelbar aktualisiert werden. Hierbei wurde insbesondere der oben beschriebene Produktzustand um die *Prozess- und Qualitätsdaten* Drehmoment und Drehwinkel der produktspezifischen Sitzverschraubungen ergänzt.

Darüber hinaus konnte mit dem Abgang des Fahrzeugs bzw. des verbauten Fahrzeugsitzes aus dem Produktionsmodul ein weiteres produktspezifisches Ereignis RFID-basiert generiert und an das Ereignisverwaltungssystem weitergeleitet werden. Dieses umfasst, neben der Produkt-ID des Fahrzeugsitzes und den relevanten Informationen zu der spezifischen Ereignisgenerierung (Zeitpunkt, Ort und Grund), ebenfalls die Prozessinformationen Drehmoment und Drehwinkel. Diese quantitativen *Qualitätsmerkmale* (Wie?) ergänzen den Auftragsstatus um produktspezifische Daten und dienen zur Dokumentation des produktspezifischen Verschraubungsprozesses im Ereignisverwaltungssystem.

9.2.2 Umsetzung situationsbasierter Steuerungsverfahren in SAP ME

Im Rahmen des Forschungsprojektes „CyProS“ (Cyber-Physische Produktionssysteme), das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird, erfolgt die weiterführende Integration des Softwareproduktes *SAP Manufacturing Execution* (SAP ME 6.0) in eine produktionstechnische Versuchsanlage. Ziel dieser Integration ist die technische Umsetzung und Validierung des zentralen Steuerungselements Steuerungsassistenzsystem (vgl. Abschnitt 7.2.2.1) und des Aufgabenbereiches intuitive Informationsbereitstellung des SAS-Mitarbeiterdialogs (vgl. Abschnitt 7.2.3.1). Dies erfolgt am Beispiel der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe (vgl. Abschnitt 8.2), wobei auf der ersten Freigabestufe die situationsbasierte ConWIP-Steuerung (vgl. Abschnitt 8.2.2.2) als bestandsregelndes Verfahren festgelegt wurde. Zu diesem Zweck wurde ein Steuerungsszenario erarbeitet, das auf drei Produktionsmodulen aufsetzt. Jedes dieser Produktionsmodule beinhaltet ein Arbeitssystem, das mit der notwendigen RFID-Hardware (HF-Antenne, Schreib-/Lesegerät, RFID-Applikationssoftware etc.) ausgestattet wird. Bei den Arbeitssystemen handelt es sich um

9 Technische Umsetzung und Validierung

eine kamerabasierte Qualitätssicherungsstation (*Prüfen*), eine CNC-Drehmaschine (*Fertigung*) sowie einen Arbeitstisch zur manuellen Endmontage (*Montage*) des Produktes.

Die Einbindung der RFID-Technologie an jedem Produktionsmodul sowie des hochauflösenden Kamerasystems der Qualitätssicherungsstation erfolgt über SAP Plant Connectivity (PCo) Agenten. Die Kommunikation zwischen der CNC-Drehmaschine und SAP ME wird über einen OPC UA (Unified Architecture) Server gewährleistet.

Als Beispielprodukt wurde ein einstufiges Zahnradgetriebe ausgewählt, das sich aus mehreren Komponenten (Getriebegehäuse, Getriebedeckel, Antriebswelle, Abtriebswelle und Anbauteile) zusammensetzt und mit einer hohen Variantenzahl produziert werden kann. Dabei wurde das Getriebegehäuse als Hauptkomponente und der Motorflansch als Nebenkomponekte definiert (vgl. Abschnitt 6.4.2) und mit einem RFID-Transponder (HF-Datenträger, Speicherkapazität 64 Byte) ausgestattet, sodass diese Komponenten im vorliegenden Steuerungsszenario als *intelligente Produkte* agieren können (vgl. Abbildung 47).

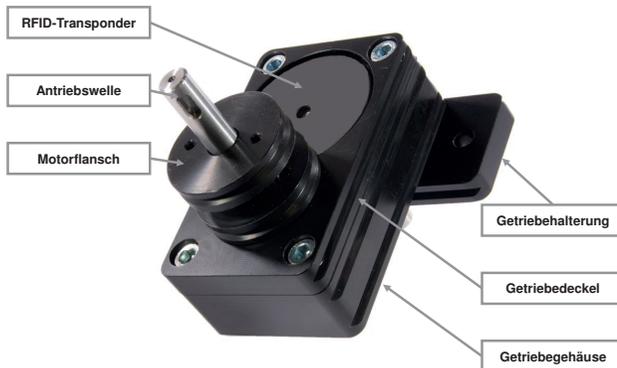


Abbildung 47: Einstufiges Zahnradgetriebe (Foto: G. Sigl, iwv)

Als Fertigungsmanagementsystem ist das Softwareprodukt SAP ME in der Lage, die in Abschnitt 7.2.2.1 definierten Aufgabenbereiche auszuführen. Es eignet sich aus diesem Grund zur Umsetzung des zentralen *Steuerungssystem*, welches in dem vorliegenden Steuerungsszenario die *synchrone zweistufige Auftragsfreigabe* situationsbasiert ausführt.

Dabei wird auf der *ersten Freigabestufe* ein neuer Produktionsauftrag (Losgröße 1) im Qualitätssicherungsmodul gemäß der ConWIP-Steuerung freigegeben, sobald ein Zahnradgetriebe am Endmontagemodul fertiggestellt und RFID-basiert identifiziert werden konnte. Der Auftragsvorrat zur Qualitätsprüfung wird damit ereignisgesteuert aktualisiert und der Umlaufbestand (Anzahl an Aufträgen) auf einem konstanten Niveau gehalten.

Nachdem die kamerabasierte Prüfung des Getriebegehäuses (Hauptkomponente) an der Qualitätssicherungsstation (Synchronisationspunkt) erfolgreich abgeschlossen wurde („Getriebegehäuse i. O.“), wird die *zweite Freigabestufe* über den Echtzeit-Trigger ad hoc ausgeführt. Eine Qualitätsprüfung wird dabei als erfolgreich bezeichnet, wenn alle Bohrungsdurchmesser des Getriebegehäuses innerhalb eines definierten Toleranzbereichs liegen. Mit der zweiten Freigabestufe wird der Arbeitsvorrat an der CNC-Drehmaschine unmittelbar um die zugehörige Nebenkomponente Motorflansch aktualisiert, wodurch die *zeitliche Synchronisation* der zu montierenden Produktkomponenten sichergestellt werden kann. Die Auftragssequenz der Nebenkomponenten an der CNC-Maschine entspricht folglich der Reihenfolge der durch die Hauptkomponenten ausgelösten Echtzeit-Trigger. Abbildung 48 stellt dieses Steuerungsszenario dar.

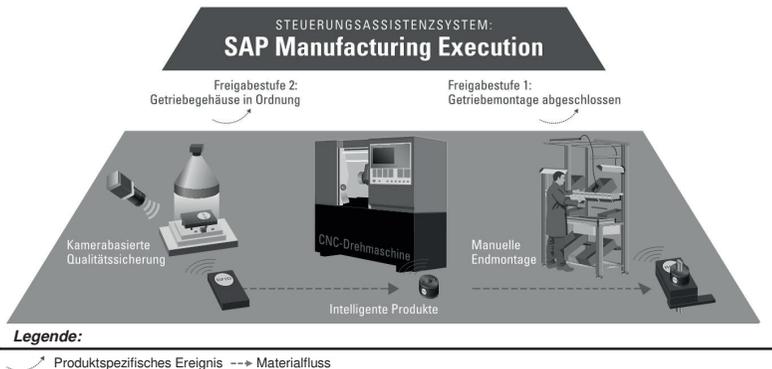


Abbildung 48: Schematische Darstellung des Steuerungsszenarios
(Grafik: B. Klimm, SALT Solutions GmbH)

Um neben der zeitlichen Synchronisation zudem eine *produktspezifische Synchronisation* der Bearbeitungsschritte umsetzen zu können, wird u. a. der Durchmesser derjenigen Gehäusebohrung als quantitatives Qualitätsmerkmal kamerabasiert erfasst, die für die Antriebswelle des Getriebes vorgesehen ist. Die Ausprägung dieses produktspezifischen Merkmals wird der Drehmaschine mit dem ereignisgesteuerten Echtzeit-Trigger über den OPC UA Server kommuniziert. Der Ist-Durchmesser dieser Gehäusebohrung dient dabei zur automatischen Anpassung des Soll-Durchmessers der zentralen Bohrung des Motorflansches. Durch eine solche Angleichung der Fertigungsparameter kann eine Matched Assembly beispielhaft realisiert werden. Der kamerabasiert erfasste Bohrungsdurchmesser des Getriebegehäuses wird zusätzlich als prozessuales Qualitätsdatum auf dem RFID-Transponder dieses intelligenten Produktes gespeichert.

Über die sogenannten SAP ME Werkerdialoge, die als *SAS-Mitarbeiterdialoge* in jedem Produktionsmodul instanziiert sind, bekommen die Verantwortlichen

9 Technische Umsetzung und Validierung

steuerungsrelevante Informationen intuitiv bereitgestellt. Hierzu zählt die Ad-hoc-Kommunikation des terminorientiert priorisierten Auftragsvorrats, der in der vorgegebenen Reihenfolge abgearbeitet werden sollte. Darüber hinaus werden in Abhängigkeit der RFID-basiert identifizierten Produktkomponenten und des relevanten Arbeitsvorgangs animierte Arbeitspläne als prozessspezifische Informationen zur Verfügung gestellt. So kann sichergestellt werden, dass der produktspezifische Produktionsprozess möglichst effizient, zielgerichtet und fehlerfrei ausgeführt werden kann.

The image displays three screenshots of the SAP ME (Manufacturing Execution) interface. The top screenshot shows a task list table with columns for PSN, Material, Menge, Priorität, Vorgangsbeginn, Fertigungsauftrag, Status, and Vorgang. The table contains five rows of data for material F-1002, all with a status of 'Aktiv' and a task of 'MONTIEREN1'. Below the table are various icons for navigation and actions. The bottom two screenshots show interactive work instructions. The left one displays a 3D model of a mechanical part with a 'Prüfmerkmal 10' (Inspection Feature 10) and a description: 'Mitar/Sensuch, 2 Bohrungen, #10x17x1,5mm'. The right one shows a 3D model of a different part with a 'Prüfmerkmal 2' (Inspection Feature 2) and a description: 'Leerlaufdrehmoment messen' (Measure no-load torque).

PSN	Material	Menge	Priorität	Vorgangsbeginn	Fertigungsauftrag	Status	Vorgang
100036	F-1002	1	1	26.04.2014 10:14	9990005	Aktiv	MONTIEREN1
100048	F-1002	1	2	26.04.2014 10:16	9990007	Aktiv	MONTIEREN1
100049	F-1002	1	3	26.04.2014 10:18	9990007	Aktiv	MONTIEREN1
100050	F-1002	1	4	26.04.2014 10:18	9990007	Aktiv	MONTIEREN1
100051	F-1002	1	5	26.04.2014 10:19	9990007	Aktiv	MONTIEREN1

Abbildung 49: Intuitive Informationsbereitstellung über den in SAP ME umgesetzten SAS-Mitarbeiterdialog

9.2.3 Zwischenfazit

Die technischen Umsetzungen im vorliegenden Abschnitt haben gezeigt, dass sich die zentralen und dezentralen Steuerungselemente des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements sowie deren Interaktion im produktiven Umfeld realisieren lassen.

Im Rahmen des Szenarios in der Automobilindustrie konnte die Umsetzbarkeit und die Ad-hoc-Kommunikation der Steuerungselemente intelligentes Produkt und Ereignisverwaltungssystem unter Einsatz der RFID-basierten Betriebsdatenerfassung des SAS-Mitarbeiterdialogs aufgezeigt werden. Zudem wurde verdeutlicht, dass sich der aktuelle Auftragsstatus und Produktzustand adäquat über die eingeführten Ereignis- und Transponderdatenstrukturen abbilden lassen.

Durch die Implementierung von SAP ME in die produktionstechnische Versuchsanlage, konnte die Umsetzbarkeit des Steuerungsassistenzsystems, als zentrales Steuerungselement der Referenzarchitektur, dargestellt werden. Insbesondere die Abbildung und situationsbasierte Ausführung der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe zeigen die technische Machbarkeit von modulübergreifenden Steuerungsverfahren auf. Durch die Erfassung und Kommunikation von quantitativen Qualitätsmerkmalen, kann neben der zeitlichen auch eine produktspezifische Synchronisation von Produktionsabläufen vorgenommen werden. Die intuitive Informationsbereitstellung über den SAS-Mitarbeiterdialog unterstützt die Abläufe im Produktionsmodul und kann zur dezentralen Entscheidungsfindung im Rahmen der Produktionssteuerung eingesetzt werden.

9.3 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung

9.3.1 Allgemeines

Um neben der technischen Umsetzung des Informationsmanagements eine quantitative Aussage über den Nutzen und die Leistungsfähigkeit des Systems zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung treffen zu können, erfolgt in dem vorliegenden Abschnitt eine simulationsgestützte Validierung der entwickelten Verfahren zur situationsbasierten Auftragsfreigabe, Reihenfolgebildung und Kapazitätssteuerung. Darüber hinaus erfolgt die beispielhafte Anwendung der steuerungorientierten Produktionsmodularisierung im Rahmen zweier Anwendungsbeispiele.

Gemäß VDI-RICHTLINIE 3633 (2010, S. 3) handelt es sich bei einer Simulation um das *„Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind. [...] Im weiteren Sinne wird unter Simulation das Vorbereiten, Durchführen und Auswerten gezielter Experimente mit einem Simulationsmodell verstanden.“*

Die Experimente wurden unter Einsatz des objektorientierten Werkzeuges zur Ablaufsimulation *Plant Simulation* durchgeführt. Um einerseits den spezifischen Mehrwert der Steuerungsverfahren zu verdeutlichen und andererseits die Unabhängigkeit des Steuerungssystems von einem vorliegenden Fertigungsprinzip

aufzeigen zu können, wurden zwei unterschiedliche Produktionsumgebungen in jeweils einem Simulationsmodell abgebildet. Zum einen konnte dabei eine verteilte Fließmontage umgesetzt werden, zum anderen wurde eine Werkstattfertigung aufgebaut, die durch zusätzliche Freiheitsgrade geprägt ist.

9.3.2 Situationsbasierte Produktionssteuerung in der Fließmontage

9.3.2.1 Beschreibung des Produktionssystems

Bei dem in Abschnitt 9.2.1 betrachteten Automobilzulieferer sollen an einem weiteren Standort Fahrzeugsitze für Nutzfahrzeuge in Losgröße 1 produziert und über Logistikdienstleister an unterschiedliche Nutzfahrzeughersteller geliefert werden. Es werden dabei zwei grundsätzlich verschiedene Sitztypen hergestellt, die in unterschiedlichen Ausprägungen erhältlich sind, woraus eine sehr hohe Variantenvielfalt und Steuerungskomplexität resultiert. Die Liefersequenz der Sitzvarianten wird schon zum Zeitpunkt der Auftragsfreigabe festgelegt, was zusätzlich die Vermeidung von Reihenfolgevertauschungen in der Montage erfordert (REINHART et al. 2011a).

Ein solcher Nutzfahrzeugsitz setzt sich vereinfacht aus den Produktkomponenten Sitzunterbau, Rückenlehne, Riser und Seitenblende zusammen. Unter einem Riser wird eine Komponente zur Höhenverstellung verstanden. Die Seitenblende soll in dem vorliegenden Anwendungsbeispiel stellvertretend für sämtliche sequenzierten Einzelteile betrachtet werden, die von einem Zulieferer bereitgestellt und ohne weitere Bearbeitungsschritte unmittelbar verbaut werden. Der Sitzunterbau setzt sich wiederum aus einer Sitzstruktur und einem Sitzpolster zusammen. Analog können als wesentliche Komponenten der Rückenlehne die Lehnstruktur und das Lehnepolster benannt werden. Abbildung 50 fasst die vereinfachte Produktstruktur des Nutzfahrzeugsitzes anhand eines Gozintographen zusammen.

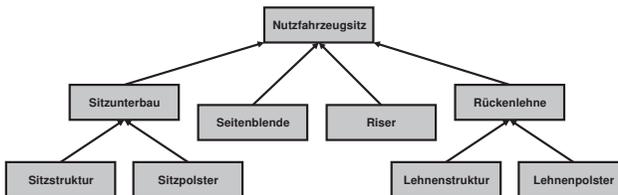


Abbildung 50: Vereinfachter Gozintograph des Nutzfahrzeugsitzes

Im Rahmen des Forschungsprojektes „RAN“ wurde die neu geplante Endmontage dieser beiden Nutzfahrzeugsitztypen simulationstechnisch untersucht. Hierbei handelt es sich um eine Fließproduktion, die sich im Wesentlichen aus neun Montageabschnitten zusammensetzt. Die Bauteile für die Montage der Sitz- und

Lehnenstruktur werden aus einem zentralen Supermarkt entnommen. Die *Sitzstrukturmontage* erfolgt anschließend an fünf lose verketteten Arbeitsstationen, bevor diese je nach Sitztyp an einer der beiden Endmontagelinien sequenziert bereitgestellt werden. Bei der *Endmontagelinie A* des wesentlich aufwendigeren Sitztyps A handelt es sich um eine getaktete Fließmontage mit 28 starr verketteten Montagestationen. Die *Endmontagelinie B* setzt sich aufgrund der geringeren Montageumfänge von Sitztyp B aus vier Arbeitsstationen zusammen. An den beiden Montagelinien werden gemäß dem sitzspezifischen Montagevorrangraphen die Produktkomponenten Sitzpolster, Seitenblende und Rückenlehne in Puffern an der relevanten Montagestation fristgerecht bereitgestellt. Die Montage der Rückenlehnen beider Sitztypen erfolgt im Rahmen der getakteten, starr verketteten *Rückenlehnenmontage*, die aus acht Stationen besteht. Die Basis hierzu stellt die zuvor ausgeführte *Lehnenstrukturmontage* mit vier Arbeitsstationen dar. Analog zu den Endmontagelinien der Sitze erfolgt die Bereitstellung der Lehnenpolster ebenfalls über einen Puffer an der Montagelinie. Die Vormontage der Sitz- und Lehnenpolster erfolgt in separaten *Vormontagebereichen* mit jeweils vier Arbeitsplätzen. Die Montage des Risers wird, sofern ein Sitz einen solchen erfordert, an einer gesonderten *Risermontagestation* vorgenommen, bevor die finale *Qualitätssicherungslinie* mit vier Prüfstationen durchlaufen wird. Die Verpackung der Sitze erfolgt sowohl typen- als auch kundenrein. Abbildung 51 stellt die Struktur des Produktionssystems schematisch dar.

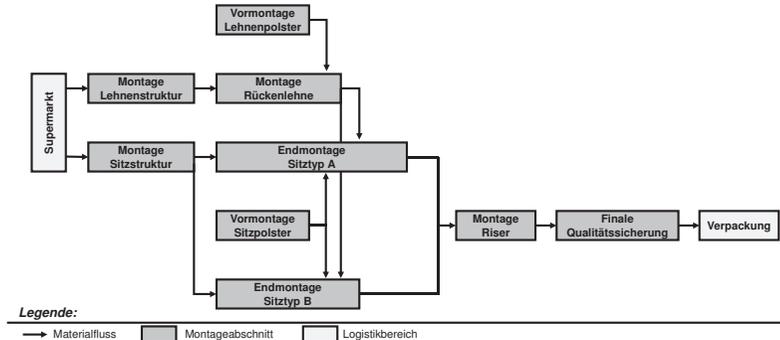


Abbildung 51: Produktionsstruktur der Fahrzeugsitzmontage (REINHART et al. 2011a)

Dieses Produktionssystem stellt die Basis zur simulationsgestützten Validierung der situationsbasierten Steuerungsverfahren synchrone zweistufige Auftragsfreigabe und intramodulare Rückstandsregelung dar. Außerdem sollen die entwickelten Prinzipien zur steuerungorientierten Produktionsmodularisierung auf dieses Praxisbeispiel angewandt werden. Aufgrund der gerichteten Materialflüsse und der systemtechnisch vorgegebenen Einhaltung der Auftragssequenz (FIFO), macht eine Validierung der situationsbasierten Reihenfolgebildung und der in-

termodularen Schlupfzeitverteilung an diesem Praxisbeispiel nur eingeschränkt Sinn. Deren Umsetzung und Validierung erfolgt im Rahmen eines weiteren Anwendungsszenarios im Abschnitt 9.3.3.

Alle Zahlenwerte wurden bei der vorherigen Beschreibung des Produktionssystems und der Simulationsannahmen bzw. -ergebnisse im weiteren Verlauf dieses Abschnitts aus Anonymitätsgründen modifiziert.

9.3.2.2 Anwendung der Modularisierungsprinzipien

Bei dem vorliegenden Produktionssystem handelt es sich um eine Fließmontage, deren Arbeitssysteme bzw. Montageabschnitte starr oder lose verkettet sind. Die Einhaltung der Auftragssequenz nach FIFO wird systemtechnisch abgesichert. Die Materialflüsse können durchgehend als gerichtet bezeichnet werden. Aus diesem Grund kann das Produktionssystem unter Anwendung der Prinzipien zur *steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung*, wie nachfolgend beschrieben, strukturiert werden.

Die *produktbezogenen Modularisierungsprinzipien* verfolgen das Ziel einer geringen Materialflusskomplexität mit gerichteten Materialflüssen auf Basis der Struktur der herzustellenden Produkte (vgl. Abschnitt 6.2). In dem vorliegenden Produktionssystem ist der produktspezifische Materialfluss systemtechnisch vorgegeben und gerichtet. Eine Anwendung dieser Modularisierungsprinzipien ist somit nicht erforderlich.

Die *ressourcenbezogenen Prinzipien* fokussieren auf die Berücksichtigung ressourcenspezifischer Eigenschaften im Zuge der Produktionsmodularisierung (vgl. Abschnitt 6.3). Dabei liegen in dem betrachteten Praxisbeispiel weder inhärente Prozessabhängigkeiten (z. B. Wärmebehandlung) vor noch weist das Produktionssystem Engpass-Arbeitssysteme auf. Jedoch sind alle Arbeitssysteme entweder als lose verkettete Reihenmontage oder als starr verkettete, getaktete Fließmontage organisiert. Alle Montage-Arbeitsstationen, die dem gleichen Takt unterliegen oder einer Reihenmontage angehören, werden gemäß diesem Modularisierungsprinzip zu jeweils einem Produktionsmodul gruppiert. Das erste Arbeitssystem bildet dabei den Modulzugang und das letzte den Modulabgang, wobei an diesen Stationen das RFID-basierte hybride Informationsmanagement zur Auftragsidentifikation und Ereignisgenerierung implementiert wird.

Mit den *steuerungsbezogenen Modularisierungsprinzipien* (vgl. Abschnitt 6.4) werden die Anforderungen der umzusetzenden Steuerungsverfahren synchrone zweistufige Auftragsfreigabe und intramodulare Rückstandsregelung bei der Produktionsmodularisierung berücksichtigt.

Für die Auftragsfreigabe ist in einem ersten Schritt die Kategorisierung der zu montierenden Produktkomponenten erforderlich. Mit Hilfe des Montagevorrang-

graphen, der sich unmittelbar in der Produktionsstruktur wiederfindet (vgl. Abbildung 23 und Abbildung 51), können die Sitzstruktur bzw. der Sitzunterbau als Hauptkomponente und die Lehnenstruktur bzw. die Rückenlehne als zu synchronisierende Nebenkomponekte definiert werden, die jeweils mit einem RFID-Transponder ausgestattet werden. Die Vormontage des Sitz- bzw. Lehnenpolsters lässt sich ebenfalls über die zweite Freigabestufe synchronisieren, weshalb diese Bauteile auch als Nebenkomponekten bestimmt werden. Als Synchronisationspunkte werden über die Vorwärts- und Rückwärtsrechnung der Abschluss der Sitzstrukturmontage (Synchronisationspunkt 1) und der Lehnenstrukturmontage (Synchronisationspunkt 2) instanziiert. Am Synchronisationspunkt 1 gibt die Hauptkomponente Sitzstruktur über die zweite Freigabestufe die Montage der Nebenkomponekten Lehnenstruktur und Sitzpolster frei. Die Nebenkomponekte Lehnenstruktur triggert am Synchronisationspunkt 2 die Vormontage des Lehnenpolsters.

Die Anwendung der intramodularen Rückstandsregelung hat eine erhöhte Relevanz für die nach dem Verrichtungsprinzip organisierte Einzel- und Kleinserienfertigung. Der Nutzen und die Leistungsfähigkeit des Verfahrens kann jedoch auch im Rahmen der vorliegenden getakteten Fließmontage aufgezeigt werden, wenn ein Produktionsmodul über eine Störung in Rückstand gerät und über einen Springer entsprechende Kapazitätsflexibilität geschaffen wird. Die seitens des Verfahrens geforderte strikte Trennung von nach dem Verrichtungsprinzip organisierten Arbeitssystemen einerseits und nach dem Fließprinzip organisierten Arbeitssystemen andererseits ist im betrachteten Produktionssystem gewährleistet.

Die Anwendung der Modularisierungsprinzipien bestätigt die initiale, durch die Montageabschnitte vorgegebene Modulstruktur. Die Ausführung der Steuerungsverfahren erfordert keine weitere logische Zusammenfassung von Montageabschnitten. Folgende *neun Produktionsmodule* können somit instanziiert und mit dem RFID-basierten hybriden Informationsmanagement ausgestattet werden:

- Produktionsmodul 1 (PM₁): Sitzstrukturmontage
- Produktionsmodul 2 (PM₂): Lehnenstrukturmontage
- Produktionsmodul 3 (PM₃): Endmontage A
- Produktionsmodul 4 (PM₄): Endmontage B
- Produktionsmodul 5 (PM₅): Rückenlehnenmontage
- Produktionsmodul 6 (PM₆): Vormontage Sitzpolster
- Produktionsmodul 7 (PM₇): Vormontage Lehnenpolster
- Produktionsmodul 8 (PM₈): Risermontage
- Produktionsmodul 9 (PM₉): Qualitätssicherung

Abbildung 52 verdeutlicht die Produktionsmodularisierung und stellt die Steuerungsflüsse der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe sowie der intramodularen Rückstandsregelung übersichtlich dar.

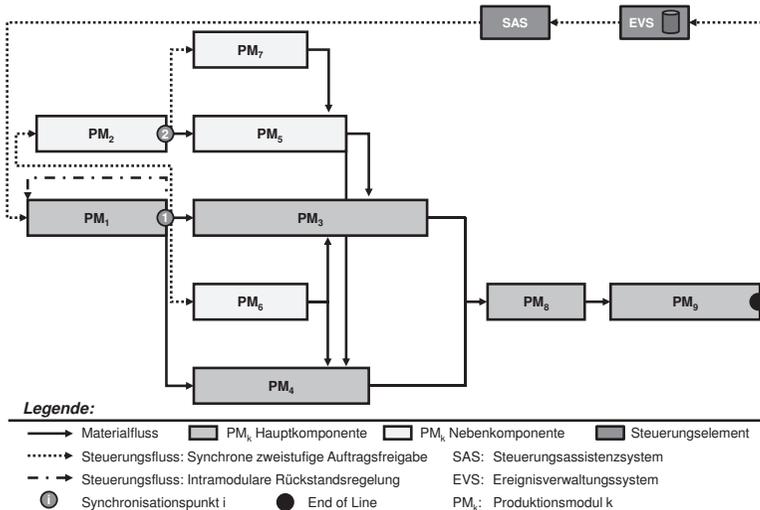


Abbildung 52: Produktionsmodularisierung und situationsbasierte Steuerungsflüsse am Beispiel der Fahrzeugsitzmontage

9.3.2.3 Validierung der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe und der intramodularen Rückstandsregelung

Eine quantitative Aussage über die Leistungsfähigkeit des Systems zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung soll durch einen systematischen Vergleich mit einer konventionell umgesetzten Produktionssteuerung erfolgen. Hierfür wurden ergänzend zu dem Referenzmodell zwei Simulationsmodelle aufgebaut, in denen als Auftragsfreigabeverfahren die direkte Auftragsfreigabe (Vergleichsmodell 1) und die konventionelle ConWIP-Steuerung (Vergleichsmodell 2) (vgl. Abschnitt 4.2.2.1) ohne Synchronisationspunkte umgesetzt wurden. Da in der Praxis eine zielgerichtete Umsetzung der Kapazitätssteuerung meist nur mangelhaft erfolgt (LÖDDING 2008, SCHUH & STICH 2011), wird das Verfahren der intramodularen Rückstandsregelung über ein Simulationsmodell validiert, in dem kein Kapazitätssteuerungsverfahren umgesetzt wurde.

Folgende Zielgrößen, Annahmen und Randbedingungen wurden für die Umsetzung der Steuerungsverfahren in Zusammenarbeit mit dem Fahrzeugsitzhersteller formuliert und beim Aufbau der Simulationsmodelle entsprechend berücksichtigt:

- Die anzustrebenden logistischen Zielgrößen sind eine möglichst geringe Durchlaufzeit und ein möglichst geringer Umlaufbestand, um einerseits flexibel auf kurzfristige Kundenwünsche reagieren zu können und andererseits das in der Produktion gebundene Kapital zu minimieren. Anhand dieser Zielgrößen soll die Bewertung der umzusetzenden Steuerungsverfahren erfolgen. Beide Zielgrößen fördern zudem, gemäß Abschnitt 2.3.2, eine möglichst hohe Termintreue.
- Die Produktionsplanung stellt über die Auftragszerzeugung eine Liste zu produzierender Produktionsaufträge bereit. Das Auftragsmengenverhältnis von Sitztyp A zu Sitztyp B beträgt 6:1. Der zu erreichende Mindestdurchsatz pro Tag (Zweischichtbetrieb) beträgt für den Sitztyp A 300 Stück und für den Sitztyp B 50 Stück.
- Die Taktzeit der verketteten Endmontagelinie A beträgt 115 Sekunden und die der verketteten Rückenlehnenmontage 90 Sekunden. Die Bearbeitungszeiten aller anderen Arbeitsstationen richten sich nach diesen beiden Taktzeiten, um eine möglichst gleichmäßige Fließproduktion zu realisieren. Aufgrund der Planungsphase, in der sich die Arbeitsvorbereitung zum Untersuchungszeitpunkt befindet, liegt noch keine vollständige Harmonisierung der Bearbeitungszeiten zwischen den Produktionsmodulen vor.
- Der Teilefluss innerhalb eines Produktionsmoduls erfolgt gemäß dem in Abschnitt 2.2.4 eingeführten One-Piece-Flow. Die Transporte zwischen den einzelnen Montageabschnitten erfolgen mit Hilfe von Transportvorrichtungen der Losgröße 5. Die Transportzeit zwischen zwei Produktionsmodulen wird pauschal mit 30 Sekunden angenommen.
- Die Verfügbarkeit der Produktionsmodule Endmontage A, Endmontage B und Rückenlehnenmontage wird mit 99 % angenommen. Durch die lose Verkettung der Arbeitsstationen in den anderen Modulen wird deren Verfügbarkeit mit 95 % angesetzt. Zur Simulation eines nicht beherrschten Prozesses oder einer Störung kann die Verfügbarkeit eines Produktionsmoduls auf 80 % reduziert werden.
- Der Simulationszeitraum beträgt 17 Stunden und 30 Minuten. Die Initialisierungsphase des Systems beträgt 1,5 Stunden. Somit kann der Betrachtungszeitraum als Zweischichtbetrieb mit jeweils acht Stunden interpretiert werden.

Im Rahmen der steuerungorientierten Produktionsmodularisierung wurden zur Ausführung der *synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe* (vgl. Abschnitt 8.2), wie oben beschrieben, neun Produktionsmodule mit zwei Synchronisationspunkten instanziiert, auf Basis dessen das RFID-basierte hybride Informationsmanagement in dem *Referenzmodell* umgesetzt wurde.

Für die *erste Freigabestufe* wurde, unter Berücksichtigung der steuerungsrelevanten Produktionsmerkmale (vgl. Abschnitt 2.2), die bestandsregelnde ConWIP-Steuerung aus dem Katalog der situationsbasierten Auftragsfreigabeverfahren

ren (vgl. Abschnitt 8.2.2.2) ausgewählt und implementiert. Dabei wird ein neuer Produktionsauftrag (Losgröße 1) ereignisgesteuert zur Bearbeitung freigegeben, sobald ein Fahrzeugsitz nach erfolgreicher Qualitätssicherung das Produktionsmodul 9 verlässt und RFID-basiert identifiziert wird. Der Umlaufbestand wird dabei in der Anzahl an Aufträgen gemessen, wobei die Bestandsgrenze auf 40 Produktionsaufträge festgelegt wurde. Über einen Freigabealgorithmus wird sichergestellt, dass das vorgegebene Mengenverhältnis 6:1 von Sitztyp A zu Sitztyp B eingehalten wird.

Mit der ersten Freigabestufe der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe startet die Montage der mit einem RFID-Transponder ausgestatteten Hauptkomponente Sitzstruktur im Produktionsmodul 1. Sobald diese Produktkomponente alle modulspezifischen Bearbeitungsschritte erfolgreich durchlaufen hat und den Synchronisationspunkt 1 am Modulausgang erreicht, wird die Montage der Nebenkomponente Lehnstruktur im Produktionsmodul 2 ereignisgesteuert mittels der *zweiten Freigabestufe* freigegeben (vgl. Abschnitt 8.2.3). Zusätzlich erfolgt über dieses produktspezifische Ereignis ad hoc die synchrone Freigabe der Vormontage des Sitzpolsters im Produktionsmodul 6. Sobald die Lehnstruktur, die ebenfalls als intelligentes Produkt agiert, das Ende des Produktionsmoduls 2 und damit den Synchronisationspunkt 2 erreicht hat, erfolgt die Freigabe der weiteren Nebenkomponente Lehnpolster zur Vormontage im Produktionsmodul 7 (vgl. Abbildung 52).

Um die logistische Zielerreichung der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe anhand der angestrebten Zielgrößen geringe Durchlaufzeit und minimaler Umlaufbestand bewerten zu können, erfolgt in einem ersten Schritt der Vergleich zur direkten Auftragsfreigabe. Bei diesem Steuerungsverfahren wurden weder eine Bestandsregelung noch eine Synchronisation der Montagabläufe umgesetzt. Ein neuer Produktionsauftrag wird in diesem Fall mit allen Produktkomponenten freigegeben, sobald die erste Arbeitsstation im Produktionsmodul 1 für die Bearbeitung zur Verfügung steht. Der Freigabealgorithmus zur Einhaltung des geforderten Mengenverhältnisses 6:1 wird auch bei diesem *Vergleichsmodell 1* aufgerufen.

Um den Effekt der Bestandsregelung auf der ersten Freigabestufe und der Synchronisation der Produktionsabläufe auf der zweiten Freigabestufe der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe besser verdeutlichen zu können, wurde zusätzlich ein *Vergleichsmodell 2* aufgebaut, in welchem lediglich die ConWIP-Steuerung, ohne zeitliche Synchronisation der Nebenkomponenten, umgesetzt wurde. Somit werden mit der ereignisgesteuerten, bestandsregelnden Freigabe eines neuen Produktionsauftrags alle auftragsspezifischen Produktkomponenten gleichzeitig für die Montage freigegeben.

9.3 Simulationsbasierte Umsetzung und Validierung

Tabelle 9 fasst die logistische Zielerreichung der drei Simulationsstudien zusammen. Dabei wird jeweils das initialisierte System für einen Simulationszeitraum von 16 Stunden (Zweischichtbetrieb) betrachtet.

Tabelle 9: Ergebnisse der drei zu vergleichenden Simulationsmodelle

		Direkte Auftragsfreigabe		ConWIP-Steuerung		Synchrone zweistufige Auftragsfreigabe	
		Vergleichsmodell 1		Vergleichsmodell 2		Referenzmodell	
		Sitztyp A	Sitztyp B	Sitztyp A	Sitztyp B	Sitztyp A	Sitztyp B
Betrachtungszeitraum	[hh:mm:ss]	16:00:00		16:00:00		16:00:00	
Mittlere Durchlaufzeit ZDL_m	[hh:mm:ss]	03:23:33	02:22:29	01:40:51	01:26:45	01:37:01	01:09:40
Mittlerer Umlaufbestand WIP_m	[# Aufträge]	98		40		40	
Gesamtdurchsatz D_{ges}	[# Aufträge]	372	74	295	60	319	58
Mittlere Auslastung A_m	[%]	91,46		81,86		86,93	

Die Implementierung der ConWIP-Steuerung auf der ersten Freigabestufe und die damit verbundene Regelung des Umlaufbestandes erlauben eine Reduktion der mittleren Durchlaufzeiten der beiden Sitztypen um etwa 51 % (Sitztyp A) bzw. 39 % (Sitztyp B). Durch die Implementierung der zweiten Freigabestufe der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe konnten die mittleren Durchlaufzeiten um weitere 4 % bzw. 20 % in Richtung der Minimaldurchlaufzeiten reduziert werden (vgl. Abbildung 53). Die Durchlaufzeitreduzierung ist dabei maßgeblich auf aufgelöste Blockaden (z. B. durch fehlende Baugruppen) und reduzierte Liegezeiten im Produktionsablauf zurückzuführen, die aufgrund synchroner Montageabläufe in Folge der echtzeitnahen Informationsflüsse erreicht werden.

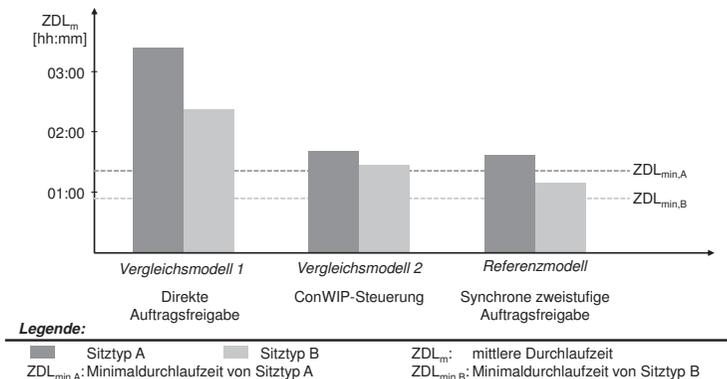


Abbildung 53: Durchlaufzeiten der drei Auftragsfreigabeverfahren im Vergleich (ENGELHARDT et al. 2013)

Hinsichtlich des mittleren Umlaufbestandes wird deutlich, dass die Bestandsregelung der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe greift und sich nach der Initialisierungsphase (1,5 Stunden) ein konstanter Umlaufbestand von 40 freigegebenen Produktionsaufträgen in der Montage einstellt. Der mittlere Umlaufbestand

9 Technische Umsetzung und Validierung

des Vergleichsmodells liegt um mehr als 140 % über dem des Referenzmodells, was mit der fehlenden Bestandsregelung begründet werden kann.

Im Hinblick auf den Gesamtdurchsatz erreichen das Referenzmodell und das Vergleichsmodell 1 den geforderten Mindestdurchsatz von 300 Sitzen vom Typ A und 50 Sitzen vom Typ B. Ohne die zweite Freigabestufe und die damit erzielte Synchronität wäre dies beim Referenzmodell, analog dem Vergleichsmodell 2, nicht der Fall. Der Grund für den höheren Durchsatz bei der direkten Auftragsfreigabe liegt in der höheren Auslastung des Produktionssystems begründet. Materialflussabbrisse werden durch den höheren Umlaufbestand weitestgehend vermieden und die unzureichende Harmonisierung der Bearbeitungszeiten zwischen den Produktionsmodulen wird verdeckt.

Zur Validierung der situationsbasierten Kapazitätssteuerung wurde in dem Referenzmodell, neben der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe, die *intramodularen Rückstandsregelung* implementiert (vgl. Abschnitt 8.4). Diese verfolgt das Ziel, aktuelle Rückstände bzw. Planabweichungen im Produktionsablauf zu identifizieren und diese mit adäquaten Maßnahmen der Kapazitätsflexibilität auszuregulieren, um eine möglichst hohe Termintreue zu gewährleisten. Aus diesem Grund wurde, zur Simulation eines nicht beherrschten Montageprozesses oder einer Störung, die Verfügbarkeit im Produktionsmodul 1 zur Sitzstrukturmontage von 95 % auf 80 % reduziert. In diesem Produktionsmodul werden zum einen alle Produktionsaufträge bearbeitet und zum anderen können durch die lose Verkettung der Arbeitsstationen und die damit verbundene Puffermöglichkeit adäquate Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung umgesetzt werden. Aus diesem Grund wurde es zur Validierung der intramodularen Rückstandsregelung ausgewählt.

Im Zuge der *situationsbasierten Rückstandsmessung* wird mit Hilfe der mittleren Durchlaufzeit in der Sitzstrukturmontage (ca. neun Minuten) der aktuelle Modulrückstand $RS_1(t)$ zum Zeitpunkt t als Differenz zwischen dem Plan-Abgang $AB_{Plan,1}(t)$ und dem Ist-Abgang $AB_{Ist,1}(t)$ betriebsparallel berechnet. Informationsgrundlage hierzu stellen die produktspezifischen Ereignisse dar, die am Modulausgang von jeder erfolgreich montierten Sitzstruktur generiert werden.

Die *Ad-hoc Kapazitätsanpassung* wird situationsbasiert ausgelöst, sobald der Grenzurückstand $RS_{Grenz,1}$ des Produktionsmoduls 1 durch den aktuellen Modulrückstand $RS_1(t)$ überschritten wird. Der Wert des Grenzurückstands wurde dabei auf sechs Minuten festgelegt, sodass als Auslösungsbedingung der Ad-hoc-Kapazitätsanpassung gilt:

$$RS_1(t) > 6 = RS_{Grenz,1} \quad (30)$$

mit $RS_1(t)$ aktueller Modulrückstand im Produktionsmodul 1 [Min]
 $RS_{Grenz,1}$ Grenzurückstand von Produktionsmodul 1 [Min]

Sofern der Grenzüberschreitung ist, wird in dem betrachteten Produktionsmodul zur Sitzstrukturmontage die Mitarbeiterkapazität kurzfristig um 50 % erhöht. Dafür wird ein *mehrfachqualifizierter Springer* eingesetzt, der die beiden Mitarbeiter im Produktionsmodul bei der Ausführung der Montageschritte an den fünf Arbeitsstationen unterstützt. Hierdurch kann die mittlere Durchlaufzeit der Sitzstrukturmontage, im Vergleich zum Produktionsablauf ohne intramodulare Rückstandsregelung, kurzfristig um ca. 40 % reduziert werden. Diese Ad-hoc-Kapazitätsanpassung schafft eine unmittelbare Ausregelung des entstandenen Rückstands. Die eingesetzte Kapazität wird auf zwei Mitarbeiter reduziert, sobald der aufgebaute Rückstand abgearbeitet und für mindestens vier Minuten (erfolgreiche Montage von ca. fünf Sitzstrukturen) kein neuer Rückstand aufgebaut wurde. Abbildung 54 zeigt die auftragsspezifischen, mittleren Durchlaufzeiten in der Sitzstrukturmontage mit und ohne intramodulare Rückstandsregelung. Der Verlauf der polynomischen Trendlinien verdeutlicht die Wirkung dieses Steuerungsverfahrens sowie dessen Leistungsfähigkeit.

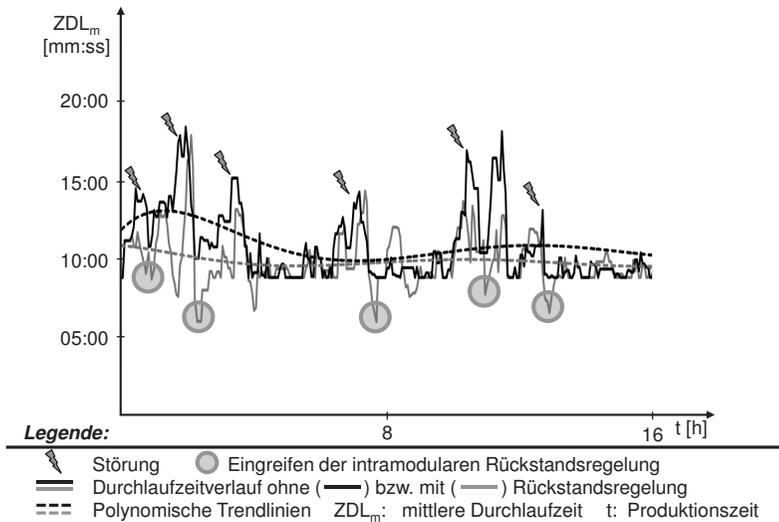


Abbildung 54: Durchlaufzeitverläufe in der Sitzstrukturmontage mit und ohne intramodularer Rückstandsregelung

9.3.3 Situationsbasierte Reihenfolgebildung in der Werkstattfertigung

9.3.3.1 Beschreibung des Produktionssystems

Zur simulationsgestützten Validierung der situationsbasierten Reihenfolgebildung und der intermodularen Schlupfzeitverteilung wird in dem vorliegenden Kapitel die nach dem Verrichtungsprinzip organisierte Produktion des in Abschnitt 9.2.2 vorgestellten einstufigen Zahnradgetriebes (vgl. Abbildung 47) betrachtet. Durch eine entsprechende Variation der Produktkomponenten bezüglich Spezifikation und Kombination wurden insgesamt 20 Getriebevarianten definiert, die sich hinsichtlich der Produktionsanforderungen und Bearbeitungsaufwände erheblich unterscheiden. Hierdurch lassen sich die Produktionsabläufe eines hochvarianten Produktspektrums simulationstechnisch umsetzen. Abbildung 55 stellt die Produktstruktur des Getriebes anhand eines Gozintographen dar.

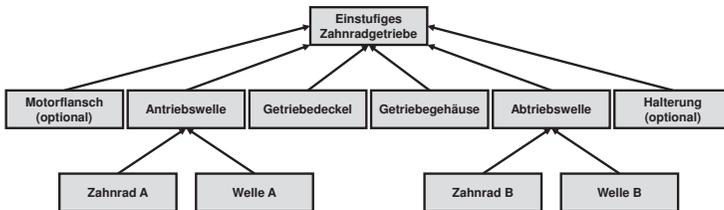


Abbildung 55: Gozintograph der Getriebestruktur

Zur Darstellung der Herstellungsprozesse wurde eine Werkstattfertigung im Simulationsmodell abgebildet, die sich aus neun Arbeitssystemen zusammensetzt (vgl. Abbildung 56).

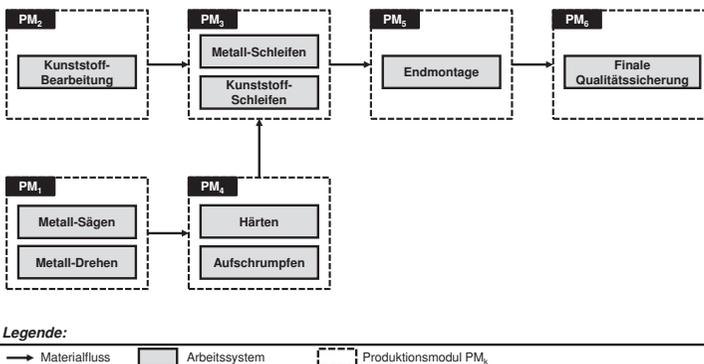


Abbildung 56: Produktions- und Modulstruktur der Getriebeproduktion

Die spanende Fertigung der metallischen Komponenten Antriebs- und Abtriebswelle erfolgt auf einer *Metall-Kreissäge* und einer *Metall-CNC-Drehmaschine*. Die Wärmebehandlung der Zahnräder findet mittels eines *Härteofens* statt, die, vor der Abschreckung im Ölbad, auf die Wellen aufgeschraubt werden. Das hierfür relevante Arbeitssystem wird nachfolgend als *Aufschraubsystem* bezeichnet. Die Kunststoffkomponenten Getriebegehäuse und -deckel sowie die optionalen Anbauteile Motorflansch und Halterung werden auf einem *Kunststoff-CNC-Bearbeitungszentrum* spanend bearbeitet. Sämtliche Schleifprozesse erfolgen in der Schleiferei auf der *Metall-CNC-Schleifmaschine* bzw. der *Kunststoff-CNC-Schleifmaschine*. Die *Endmontage* der Getriebe wird auf einer Werkbank vorgenommen, genauso wie die finale *Qualitätssicherung*, die für alle fertiggestellten Zahnradgetriebe durchgeführt wird.

Abbildung 56 stellt die Struktur des beschriebenen Produktionssystems sowie die im nachfolgenden Abschnitt 9.3.3.2 hergeleitete steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung schematisch dar.

9.3.3.2 Anwendung der Modularisierungsprinzipien

Bei dem vorliegenden Produktionssystem handelt es sich um eine Werkstattfertigung mit geringer Materialflusskomplexität, da für Metall- und Kunststoffkomponenten jeweils materialspezifische Arbeitssysteme modelliert wurden, die, mit Ausnahme des Motorflansches, keine alternativen Fertigungsstationen aufweisen. Das Produktionssystem kann unter Anwendung der Prinzipien zur *steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung*, wie nachfolgend beschrieben, strukturiert werden.

Zur *produktbezogenen Produktionsmodularisierung* wird eine Produkt-Arbeitssystem-Matrix erstellt (vgl. Abschnitt 6.2.2), die zur Identifikation von redundanten Arbeitssystemen und parallelen, produktübergreifenden Prozessketten eingesetzt wird (vgl. Tabelle 10).

Tabelle 10: Produkt-Arbeitssystem-Matrix der Getriebeproduktion

		Antriebswelle	Abtriebswelle	Getriebegehäuse	Getriebedeckel	Motorflansch (optional)	Halterung (optional)
AS ₁	Metall-Sägen	AV ₁	AV ₁				
AS ₂	Metall-CNC-Drehen	AV ₂	AV ₂			AV ₁	
AS ₃	Härten	AV ₃	AV ₃				
AS ₄	Aufschrubmen	AV ₄	AV ₄				
AS ₅	Kunststoff-CNC-Bearbeitung			AV ₁	AV ₁	AV _{1,2}	AV ₁
AS ₆	Metall-Schleifen	AV ₆	AV ₆				
AS ₇	Kunststoff-Schleifen			AV ₂	AV ₂	AV ₂	AV ₂
AS ₈	Endmontage	AV ₆	AV ₆	AV ₃	AV ₃	AV ₃	AV ₃
AS ₉	Qualitätssicherung	AV ₇	AV ₇	AV ₄	AV ₄	AV ₄	AV ₄

Legende:

- AS_i: Arbeitssystem i
- AV_i, AV_j: Arbeitsvorgang i
- Redundante Arbeitssysteme

- Parallele, produktübergreifende Prozesskette 1
- Parallele, produktübergreifende Prozesskette 2
- Parallele, produktübergreifende Prozesskette 3

Demnach lassen sich drei parallele, produktübergreifende Prozessketten identifizieren, die die Modularisierung der Arbeitssysteme zur Metallbearbeitung (Prozesskette 1) einerseits und zur Kunststoffbearbeitung (Prozesskette 2) andererseits motivieren. Prozesskette 3 empfiehlt wiederum die Zusammenfassung der Arbeitssysteme zur Endmontage und Qualitätssicherung zu einem Produktionsmodul. Da es sich bei dem identifizierten redundanten Arbeitssystem des Motorflansches um eine Drehmaschine handelt, die primär zur Bearbeitung von Metallkomponenten eingesetzt wird, wird auf eine Modularisierung dieses Arbeitssystems und dem Kunststoff-CNC-Bearbeitungszentrum verzichtet. Aufgrund der überschaubaren Anzahl an Arbeitssystemen und Produktkomponenten wird die Clusteranalyse als produktbezogenes Modularisierungsprinzip nicht durchgeführt.

Im Rahmen des *ressourcenbezogenen Prinzips* zur Modularisierung aufgrund von fertigungstechnischen Prozessabhängigkeiten werden der Härteofen und das Aufschumpfsystem, der vorliegenden Vollständigkeitsrestriktion folgend, zu einem Produktionsmodul zusammengefasst (vgl. Abschnitt 6.3.2). Wie die Simulationsergebnisse im nachfolgenden Abschnitt 9.3.3.3 verdeutlichen, handelt es sich bei dem Bearbeitungszentrum zur Kunststoffbearbeitung um einen Engpass. Aus diesem Grund wird dieses Arbeitssystem als eigenes Engpass-Produktionsmodul instanziiert (vgl. Abschnitt 6.3.3). Darüber hinaus erfolgt eine Aufteilung der Arbeitssysteme Endmontage und Qualitätssicherung in zwei unabhängige Produktionsmodule.

Mit den *steuerungsbezogenen Modularisierungsprinzipien* (vgl. Abschnitt 6.4) werden die Anforderungen der situationsbasierte Reihenfolgebildung mit intermodularer Schlupfzeitverteilung berücksichtigt. Eine Trennung von Engpass- und Nicht-Engpass-Arbeitssystemen wurde dabei in dieser rein nach dem Verichtungsprinzip organisierten Produktion bereits realisiert. Um jedoch eine höhere Informationstransparenz im Hinblick auf die Wirkung der intermodularen Schlupfzeitverteilung zu schaffen, erfolgt eine Zusammenfassung der Schleifmaschinen zur Metall- und Kunststoffbearbeitung zu einem Produktionsmodul und damit die Adaption der über die produktbezogenen Prinzipien geschaffene Modulstruktur.

Zusammenfassend werden *sechs Produktionsmodule* instanziiert und mit dem RFID-basierten Informationsmanagement ausgestattet (vgl. Abbildung 56):

- Produktionsmodul 1 (PM₁): Metall-Spanen
- Produktionsmodul 2 (PM₂): Kunststoff-Spanen
- Produktionsmodul 3 (PM₃): Schleifen
- Produktionsmodul 4 (PM₄): Wärmebehandlung
- Produktionsmodul 5 (PM₅): Montage
- Produktionsmodul 6 (PM₆): Qualitätssicherung

9.3.3.3 Validierung der situationsbasierten Reihenfolgebildung und der intermodularen Schlupfzeitverteilung

Um die Leistungsfähigkeit der situationsbasierten Reihenfolgebildung und der intermodularen Schlupfzeitverteilung zu verdeutlichen, erfolgt die Durchführung einer systematischen Simulationsstudie, bei der eine Bewertung des Referenzmodells gegen vier Vergleichsmodelle vorgenommen wird. Zur Auftragssequenzierung der Vergleichsmodelle werden konventionelle Steuerungsverfahren genutzt, die sich stufenweise an die Steuerung des Referenzmodells annähern. Folgende Zielgrößen, Annahmen und Randbedingungen wurden für die Umsetzung der Steuerungsverfahren formuliert und jeweils bei der Systemmodellierung berücksichtigt:

- Die situationsbasierte Reihenfolgebildung und die intermodulare Schlupfzeitverteilung verfolgen das primäre Ziel, eine möglichst hohe Termintreue zu gewährleisten. Aus diesem Grund werden die Steuerungsverfahren anhand dieser Zielgröße bewertet. Die rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung dient zur auslastungsorientierten Auftragssequenzierung an Engpässen unter Einhaltung von Terminvorgaben. Deshalb erfolgt zusätzlich eine Betrachtung des Gesamtdurchsatzes und der Auslastung des Engpass-Produktionsmoduls Kunststoff-Spanen.
- Die Produktionsplanung stellt über die Auftragserzeugung jeweils eine Liste zu produzierender Aufträge bereit. Es existieren dabei 20 verschiedene Produktvarianten, die jeweils in gleicher Anzahl und Losgröße 1 produziert werden.
- Als Auftragsfreigabeverfahren wurde die situationsbasierte ConWIP-Steuerung umgesetzt, die den Umlaufbestand auf fünf Produktionsaufträge regelt. Unter Berücksichtigung der durchschnittlichen Anzahl an Produktkomponenten pro Auftrag entspricht dieser Umlaufbestand etwa 25 Bauteilen.
- Die Bearbeitungs- und die Rüstzeiten der Aufträge an den Arbeitssystemen sind variantenspezifisch. Der Teilefluss innerhalb und zwischen den Produktionsmodulen erfolgt im One-Piece-Flow.
- Die Verfügbarkeit der Produktionsmodule wird mit 100 % angenommen. Zur Simulation eines nicht beherrschten Prozesses oder einer Störung wird die Verfügbarkeit im Produktionsmodul Schleifen auf 90 % reduziert.
- Der Simulationszeitraum beträgt 24 Stunden und 30 Minuten. Die Initialisierungsphase des Systems beträgt 0,5 Stunden. Somit kann der Betrachtungszeitraum als Dreischichtbetrieb mit jeweils acht Stunden interpretiert werden.

Im Rahmen der steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung wurden zur Ausführung und Validierung der *situationsbasierten Reihenfolgebildung* und *intermodularen Schlupfzeitverteilung* (vgl. Abschnitt 8.3), wie oben beschrieben,

9 Technische Umsetzung und Validierung

sechs Produktionsmodule instanziiert, auf Basis dessen das RFID-basierte hybride Informationsmanagement in dem *Referenzmodell* umgesetzt wurde.

Da es sich bei dem Bearbeitungszentrum zur Kunststoffbearbeitung um ein Engpass-Produktionsmodul handelt, wurde an diesem Modul die *situationsbasierte rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung* (vgl. Abschnitt 8.3.2.3) implementiert. Hierbei wird im Speziellen der modulspezifische Plan-Endtermin aller wartenden Produktionsaufträge berücksichtigt, um, neben einer möglichst hohen Auslastung, eine terminorientierte Bearbeitung sicherzustellen. Die Auftragssequenz an allen anderen Produktionsmodulen erfolgt nach der *situationsbasierten Schlupfzeitregelung* (vgl. Abschnitt 8.3.2.1) unter Einsatz der betriebsparallel ausgeführten, *intermodularen Schlupfzeitverteilung* (vgl. Abschnitt 8.3.3). Sofern in einem Produktionsmodul die Bearbeitung an mehr als einem Arbeitssystem erfolgt, wird die Reihenfolge ab dem zweiten auftragsspezifischen Arbeitssystem nach der FIFO-Prioritätsregel (vgl. Abschnitt 8.3.2.2) vorgenommen.

Zur Initialisierung der intermodularen Schlupfzeitverteilung erfolgt die Gewichtung der Verteilungskriterien. Da es sich bei der betrachteten Produktion um eine nach dem Verrichtungsprinzip organisierte Werkstattfertigung handelt, weisen die Produktionsmodule sehr ähnliche Freiheitsgrade auf. Dies wird ebenfalls durch die Modulvergleichsmatrix (vgl. Tabelle 11), die im Zuge des zugehörigen Verteilungsmechanismus erstellt wurde, verdeutlicht.

Tabelle 11: Modulvergleichsmatrix der Getriebeproduktion

MVW _{kl}	PM ₁	PM ₂	PM ₃	PM ₄	PM ₅	PM ₆	Summe	v _{FG,k}	
PM ₁		1	0	1	1	1	4	0,13	
PM ₂	1		0	1	1	1	4	0,13	
PM ₃	2	2		2	2	2	10	0,33	
PM ₄	1	1	0		1	1	4	0,13	
PM ₅	1	1	0	1		1	4	0,13	
PM ₆	1	1	0	1	1		4	0,13	
							Total	30	1

Legende:

- MVW_{kl}: Modulvergleichswert von PM_k zu PM_l
- PM_k: Produktionsmodul k
- v_{FG,k}: freiheitsgradbezogener Verteilungsfaktor vom PM_k

Das Produktionsmodul PM₃ Schleifen hat als einziges Produktionsmodul zwei Vorgängermodule und deshalb eine höhere Materialflusskomplexität. Außerdem können die Mitarbeiter an den Schleifmaschinen aufgrund der gleichen Technologie beliebig zwischen den beiden Arbeitssystemen wechseln, wodurch dieses Produktionsmodul eine höhere Mitarbeiterflexibilität aufweist. Aus diesem Grund wurde der Freiheitsgradfaktor lediglich mit $f_{FG} = 0,1$ angesetzt. Die durchschnittliche Modultermintreue und die modulspezifischen Durchlaufzeiten variieren zwischen den einzelnen Produktionsmodulen jedoch erheblich, weshalb der Durchlaufzeitfaktor mit $f_{DZ} = 0,4$ und der Termintreuefaktor mit $f_{TT} = 0,5$ festge-

legt wurden. Als weiterer Initialisierungsschritt der Schlupfzeitverteilung wurden der abgabe- und der verteilungsbezogene Progressionsgrad des termintreuebezogenen Verteilungsmechanismus (vgl. Abschnitt 8.3.3.3) mit jeweils $k_a = 2$ bzw. $k_v = 2$ parametrisiert.

Das *Vergleichsmodell 1* dient zur Abbildung der Auftragssequenzierung nach dem FIFO-Prinzip, die konsequent an allen Arbeitssystemen umgesetzt wurde. Da durch diese Prioritätsregel Reihenfolgevertauschungen vermieden werden, kann es als triviales, terminorientiertes Steuerungsverfahren verstanden werden, mit dem das Referenzmodell verglichen werden soll.

Das *Vergleichsmodell 2* sequenziert ebenfalls nach der FIFO-Prioritätsregel, jedoch erfolgt zusätzlich eine auslastungsorientierte Steuerung des Engpass-Produktionsmoduls, entsprechend dem Referenzmodell, unter Einsatz der situationsbasierten rüstzeitoptimierenden Reihenfolgebildung. Um die Terminorientierung der Produktionsabläufe sicherzustellen, wird der modulspezifische Plan-Endtermin der Aufträge als Nebenbedingung der Sequenzierung berücksichtigt. Mit Hilfe dieses Vergleichsmodells 2 soll die terminabgesicherte Auftragssequenzierung am Engpass-Produktionsmodul bewertet werden.

Das *Vergleichsmodell 3* steuert die Bearbeitungsreihenfolge an den relevanten Arbeitssystemen, analog dem Referenzmodell, nach der Schlupfzeitregel, jedoch ohne die Umsetzung einer Schlupfzeitverteilung. Hierdurch verstreicht ein Großteil der zur Verfügung stehenden Schlupfzeit ungenutzt und nachfolgende Produktionsmodule haben keine Möglichkeit, etwaige Verzögerungen im Produktionsablauf durch vorhandenen Schlupf auszugleichen. Die auslastungsorientierte Steuerung des Engpass-Produktionsmoduls erfolgt ebenfalls unter Einsatz der terminorientierten Rüstzeitoptimierung. Das Vergleichsmodell 3 dient zur Darstellung der Notwendigkeit einer Schlupfzeitverteilung.

Vergleichsmodell 4 ähnelt der Steuerungslogik des Referenzmodells am meisten. Dabei wird neben der Schlupfzeitregel eine einfache Schlupfzeitverteilung vorgenommen, bei der der zur Verfügung stehende Schlupf gleichmäßig über die Anzahl der noch zu durchlaufenden Module verteilt wird (vgl. Abschnitt 4.2.2.2). Die Steuerung des Engpasses erfolgt analog zu den anderen Vergleichsmodellen bzw. dem Referenzmodell. Mit diesem Vergleichsmodell 4 soll insbesondere die Leistungsfähigkeit der entwickelten intermodularen Schlupfzeitverteilung dargestellt werden.

Tabelle 12 fasst die logistische Zielerreichung der Simulationsmodelle zusammen.

Tabelle 12: Ergebnisse der zu vergleichenden Simulationsmodelle

		Vergleichsmodell 1	Vergleichsmodell 2	Vergleichsmodell 3	Vergleichsmodell 4	Referenzmodell
Gesamtermintreue TT_{ges}	[%]	55,6	63,5	66,3	66,3	68,3
Mittlere Durchlaufzeit ZDL_m	[hh:mm:ss]	01:12:13	01:09:00	01:08:16	01:08:16	01:08:53
Mittlere Durchlaufzeitstreuung	[hh:mm:ss]	00:07:52	00:16:07	00:14:40	00:14:40	00:14:59
Gesamtdurchsatz	[# Aufträge]	99	104	104	104	104
Engpass-Auslastung	[%]	100	100	100	100	100
Mittlerer Umlaufbestand WIP_m	[# Aufträge]	5	5	5	5	5

Das *Vergleichsmodell 1* weist die geringste Gesamtermintreue auf. Dies kann mit der fehlenden Berücksichtigung der auftragsspezifischen Plan-Endtermine bei der Reihenfolgebildung begründet werden, die bei den anderen Modellen über die Schlupfzeitregelung bzw. die terminorientierte Rüstzeitoptimierung gegeben ist. Die FIFO-Prioritätsregel ist allgemein geprägt von vergleichsweise geringen Streuungen der Durchlaufzeiten, was durch die Simulationsergebnisse verdeutlicht wird. Die mittlere Durchlaufzeit liegt, verglichen mit den anderen Simulationsmodellen, jedoch oberhalb und der Gesamtdurchsatz unterhalb des jeweiligen Durchschnitts, was aus der fehlenden Möglichkeit zur Reihenfolgeanpassung am Engpass-Modul resultiert. Dieser Nachteil wird im *Vergleichsmodell 2* überwunden, wodurch geringere Durchlaufzeiten, eine höherer Gesamtdurchsatz und eine um etwa 8 % gesteigerte Termintreue erreicht werden.

Die Umsetzung der situationsbasierten Schlupfzeitregel im *Vergleichsmodell 3* erlaubt eine weitere Verbesserung der priorisierten Zielgröße Termintreue um etwa 2,8 %. Der negative Effekt häufiger Reihenfolgevertauschungen und damit verbundener höherer Durchlaufzeitstreuungen kann durch die konventionelle Schlupfzeitverteilung im *Vergleichsmodell 4* nicht überwunden werden. Dies kann mit der fehlenden Berücksichtigung von modulspezifischen Charakteristika begründet werden. Außerdem weist das Produktionsmodul PM_1 für die spanende Metallbearbeitung mit einer mittleren Auslastung von ca. 29 % nur einen geringen Bedarf an zusätzlicher Schlupfzeit auf.

Die maximale Termintreue von 68,3 % bei vergleichsweise geringer Durchlaufzeit und -streuung kann mit der situationsbasierten Reihenfolgebildung mit intermodularer Schlupfzeitverteilung im *Referenzmodell* erzielt werden. Die spezifischen Charakteristika der Produktionsmodule (Durchlaufzeit, Belastung, Termintreue etc.) werden durch die Verteilungsmechanismen adäquat berücksichtigt, wodurch eine gerechte Umverteilung des zur Verfügung stehenden Schlupfes und eine Termintreuesteigerung um 2,0 % möglich werden.

9.3.4 Zwischenfazit

Die simulationstechnische Umsetzung und Validierung im vorliegenden Abschnitt haben bewiesen, dass das System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung einen erheblichen Beitrag zur logistischen Zielerreichung

leistet. Insbesondere wurden die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe, die situationsbasierte Reihenfolgebildung mit intermodularer Schlupfzeitverteilung und die intramodulare Rückstandsregelung mit ihrer jeweiligen Steuerungslogik in *Plant Simulation* implementiert. Dies verdeutlicht, dass die situationsbasierten Steuerungsverfahren informationstechnisch abbildbar und in das Steuerungssystem (vgl. Abschnitt 7.2.2.1), oder allgemein in ein Fertigungsmanagementsystem, integrierbar sind.

Im Rahmen des Praxisbeispiels zur Fließmontage wurden die Prinzipien der steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung erfolgreich angewandt und eine betriebsorganisatorische Grundlage zur Implementierung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements geschaffen. Die Umsetzung der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe hat gezeigt, dass dieses Steuerungsverfahren zum einen die Bestandsregelung in einer Produktionsumgebung und zum anderen die Synchronisation der Produktionsabläufe von zu montierenden Produktkomponenten ermöglicht. Hierdurch kann die Durchlaufzeit erheblich reduziert werden. Gleichzeitig werden Umlaufbestände minimiert, was sich einerseits auf das in der Produktion gebundene Kapital und zum anderen auf die erreichbare Termintreue unmittelbar positiv auswirkt. Die intramodulare Rückstandsregelung leistet ebenfalls einen positiven Beitrag zur Steigerung der logistischen Zielerreichung. Im Speziellen hat die simulationstechnische Umsetzung dieses Steuerungsverfahrens gezeigt, dass sich die Messung des aktuellen Rückstands betriebsparallel mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements umsetzen lässt. Zudem lassen sich geeignete Maßnahmen zur Kapazitätsanpassung ad hoc auslösen, die ein schnelles Ausregeln des Rückstands ermöglichen und so zur Steigerung der Termintreue beitragen.

Da sich eine nach dem Verrichtungsprinzip organisierte Produktion besser zur Validierung der situationsbasierten Reihenfolgebildung mit intermodularer Schlupfzeitverteilung eignet, wurden diese Steuerungsverfahren in einem Simulationsmodell implementiert, welches eine Werkstattfertigung zur Herstellung von einstufigen Zahnradgetrieben abbildet. Dabei konnte aufgezeigt werden, dass sich die Effektivität der Schlupfzeitregelung durch die betriebsparallele intermodulare Schlupfzeitverteilung steigern lässt und damit eine höhere Termintreue erzielt werden kann. Außerdem ist es möglich eine situationsbasierte rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung derart umsetzen, dass eine Auslastungsorientierung im Engpass-Produktionsmodul erfolgt, ohne dass dies einen negativen Einfluss auf die Termintreue hat.

Die Steuerungsverfahren des Systems zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung fördern durch ihre Funktion und Leistungsfähigkeit die logistische Zielerreichung im Hinblick auf die Durchlaufzeit, den Umlaufbestand und die Termintreue. Aufgrund der Gesetzmäßigkeiten der logistischen Kennlinientheorie nach NYHUIS & WIENDAHL (2003) begünstigen sich die entwickelten

Steuerungsverfahren gegenseitig, was eine ganzheitliche Ausführung der Aufgaben der Produktionssteuerung unter Einsatz des vorliegenden Steuerungssystems motiviert.

9.4 Bewertung

9.4.1 Anforderungsbezogene Bewertung

Im Rahmen des vorliegenden Abschnittes soll das System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung hinsichtlich der in Kapitel 3 formulierten Anforderungen an eine zeitgemäße Produktionssteuerung bewertet werden.

Die Anforderungen *Flexibilität* und *Adaptierbarkeit* werden von dem entwickelten Steuerungssystem erfüllt. Die Systemelemente lassen sich sowohl in nach dem Verrichtungsprinzip als auch nach dem Fließprinzip organisierten Produktionsumgebungen einsetzen bzw. implementieren. Bestehende konventionelle Steuerungsverfahren werden bei der Verfahrensentwicklung zur situationsbasierten Produktionssteuerung gezielt eingebunden und hinsichtlich einer ereignisgesteuerten Ausführbarkeit qualifiziert. Unternehmensspezifische Randbedingungen und Zielgrößen werden insbesondere bei der Produktionsmodularisierung und Verfahrensparametrierung berücksichtigt.

Die Anwendung der Modularisierungsprinzipien stellt eine *steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung* sicher, bei der neben produkt- und ressourcenbezogenen Aspekten insbesondere die spezifischen Anforderungen der situationsbasierten Steuerungsverfahren berücksichtigt werden. An dieser Stelle sei vor allem die Instanziierung von Synchronisationspunkten genannt, welche die betriebsorganisatorische und informationstechnische Basis der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe darstellen. Dieses Steuerungsverfahren ermöglicht eine sowohl zeitliche als auch produktspezifische *Synchronisierung* der Abläufe in der Produktion.

Die *Referenzarchitektur* des RFID-basierten hybriden *Informationsmanagements* stellt die *Situationsbezogenheit* der Produktionssteuerung und gleichzeitig eine hohe *Informationstransparenz* in der Fertigung und Montage sicher. Durch den Einsatz intelligenter Produkte und die Umsetzung eines Ereignisverwaltungssystems wird eine Echtzeit-Auftragsüberwachung im Steuerungsassistenzsystem ermöglicht. Darüber hinaus erfolgt die Ausführung der entwickelten situationsbasierten Steuerungsverfahren stets auf Basis des aktuellen Auftragsstatus und Produktzustands, die über Ereignis- und Transponderdaten eindeutig definiert sind.

Zuletzt gilt es die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe, die situationsbasierte Reihenfolgebildung und die intramodulare Rückstandsregelung nach den Leitsätzen für zeitgemäße Steuerungsverfahren zu bewerten:

1. Die aktuelle Produktionssituation wird mit Hilfe des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements bei der Verfahrensausführung berücksichtigt.
2. Der Katalog situationsbasierter Verfahren zur Ausführung der ersten Stufe der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe fasst ausschließlich bestandsregelnde Steuerungsverfahren zusammen. Der Umlaufbestand eines Produktionssystems wird somit auf einem definierten Niveau gehalten. Bestandsblockaden werden durch die Synchronisierung der Produktionsabläufe auf der zweiten Freigabestufe verhindert.
3. Die intramodulare Rückstandsregelung schafft einen Belastungsabgleich und etwaige Planabweichungen werden durch dieses Steuerungsverfahren ausgeregelt.
4. Mit Hilfe der intermodularen Schlupfzeitverteilung kann der Nachteil häufiger Reihenfolgevertauschungen bei der situationsbasierten Schlupfzeitregelung verhindert werden. Unter Einsatz des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements lassen sich die situationsbasierten Steuerungsverfahren effizient und einfach umsetzen.
5. Durch die gezielte Verteilung der Steuerungskompetenz auf zentrale und dezentrale Steuerungselemente des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements werden inter- und intramodulare Abhängigkeiten in der modularisierten Produktion berücksichtigt. Zudem werden dem einzelnen Modul Freiheitsgrade zur Anpassung von Produktionsabläufen eingeräumt.
6. Die situationsbasierten Steuerungsverfahren fokussieren auf die logistischen Ziele geringe Durchlaufzeit und hohe Termintreue. Engpass-Arbeitssysteme in einem Engpass-Produktionsmodul lassen sich auslastungsorientiert unter Einhaltung der Terminanforderungen steuern.

9.4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

9.4.2.1 Allgemeines

Um das System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung monetär bewerten zu können, ist es erforderlich, unternehmens- und umsetzungsspezifische Charakteristika möglichst genau zu kennen und diese in die Wirtschaftlichkeitsrechnung mit einzubeziehen. Im Allgemeinen besteht die Schwierigkeit bei einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Informationssystemen bzw. RFID-Systemen darin, dass neben den Kosten und dem quantitativen Nutzen einer solchen Investition auch der qualitative Nutzen berücksichtigt werden

muss. Eine solche Wirtschaftlichkeitsrechnung entspricht somit nicht dem betriebswirtschaftlichen Standardfall, der im Rahmen der Investitionsrechnung beispielsweise über Einzahlungs- und Auszahlungsströme abgebildet werden kann (SCHÜTTE 1998, VILKOV & WEIß 2008, OSTGATHE 2012). Aus diesem Grund stellt die monetäre Bewertung von RFID-Systemen den Schwerpunkt vieler aktueller und abgeschlossener Forschungsarbeiten dar (z. B. VILKOV & WEIß 2008, ABRAMOVICI et al. 2009, RHENSIUS & DEINDL 2009, REINHART et al. 2012).

Die *Kosten* für die Umsetzung des Systems zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung lassen sich in einmalige Kosten und laufende Kosten unterteilen. Zu den *einmaligen Kosten* zählen die sach- und personenbezogenen Investitionskosten. Die Sachkosten umfassen vor allem die Hardwarekosten für die Umsetzung der Steuerungselemente des Informationsmanagements (z. B. RFID-Schreib-/Lesegeräte, Antennen, RFID-Transponder). Die Personalkosten beziehen sich auf die Softwareentwicklung sowie die Integrationsaufwände bezüglich des Steuerungsassistenzsystems, des Ereignisverwaltungssystems sowie der RFID-Technologie. Die exakte Ermittlung dieser personenbezogenen Investitionskosten ist eine Herausforderung, da für die Einführung der RFID-Technologie in der Regel keine Standardlösungen vorhanden sind. Es liegt meist ein Projektcharakter vor, der unternehmensspezifische Anpassungen an die Einsatzbedingungen (z. B. metallisches Umfeld) erfordert (ABRAMOVICI et al. 2009, RHENSIUS & DEINDL 2009, OSTGATHE 2012). Im Rahmen der *laufenden Kosten* werden wiederum sämtliche Betriebskosten (z. B. Lizenzgebühren, Softwarewartung, Transponderinitialisierung und -handling) des Steuerungssystems berücksichtigt.

Um die Nutzenpotenziale des Systems zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung monetär bewerten zu können, muss in einem ersten Schritt der *quantitative Nutzen* einer konkreten Umsetzung (z. B. Reduzierung von Bearbeitungszeiten) ermittelt werden. Hierzu können die logistischen Zielgrößen herangezogen werden. Die Durchführung einer Simulationsstudie, in welcher das Steuerungssystem in einem konkreten Anwendungsfall implementiert wird, liefert diese charakteristischen Kennzahlen und stellt damit eine adäquate Basis für die Bewertung des quantitativen Nutzens dar (vgl. Abschnitt 9.3). Der *qualitative Nutzen* hat jedoch ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Systems. Hierzu zählen beispielsweise die Steigerung der Transparenz in der Produktion und die damit verbundene Möglichkeit zur Echtzeit-Auftragsüberwachung. Diese Nutzenpotenziale lassen sich jedoch weder direkt noch indirekt monetär bewerten, da sie nicht durch mathematische Größen repräsentiert werden (OSTGATHE 2012). Um die notwendige Quantifizierung des qualitativen Nutzens vornehmen zu können, wird beispielsweise von REINHART et al. (2011b) die Fuzzy-Logik als ein vielversprechender Ansatz benannt.

Die vorherige Darstellung hat gezeigt, dass eine vollständige monetäre Bewertung des Systems zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung nicht ohne weiteres möglich ist. Die ganzheitliche Ermittlung des Aufwands und Nutzens erfordert umfangreiche Analysen unternehmensspezifischer Umsetzungsbedingungen, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt werden können. Trotzdem wird nachfolgend, unter Einsatz konventioneller Bewertungsmethoden, eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand des in Abschnitt 9.3.2.1 vorgestellten Praxisbeispiels vorgenommen. Dabei werden sämtliche Kosten möglichst realitätsnah abgeschätzt und der erzielbare quantitative Nutzen über die Ergebnisse der durchgeführten Simulationsstudie berechnet. Qualitative Nutzenpotenziale werden in dieser monetären Bewertung nicht betrachtet.

9.4.2.2 Wirtschaftlichkeitsrechnung am Praxisbeispiel

Um das System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung anhand der in Abschnitt 9.3.2.1 vorgestellten Endmontage von Nutzfahrzeugsitzen monetär bewerten zu können, ist es in einem ersten Schritt erforderlich, sowohl ein Referenzszenario als auch ein Vergleichsszenario zu definieren. Dabei soll jeweils die Produktion des geforderten Mindestdurchsatzes pro Tag von 300 Sitzen vom Typ A und 50 Sitzen vom Typ B betrachtet werden.

Im *Referenzszenario* wird zur Produktionssteuerung die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe unter Einsatz des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements implementiert. Im *Vergleichsszenario* erfolgt die Auftragsfreigabe mit Hilfe der konventionellen ConWIP-Steuerung, die mit ConWIP-Karten umgesetzt wird (vgl. Abschnitt 4.2.2.1). In diesem Fall kann somit auf die Implementierung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements verzichtet werden. Für die Produktion des geforderten Durchsatzes können mit Hilfe der durchgeführten Simulationsstudie die in nachfolgender Tabelle 13 dargestellten Kennzahlen ermittelt werden. Dabei wurde das Produktionssystem jeweils im initialisierten Zustand betrachtet.

Tabelle 13: Simulationsergebnisse als logistische Datengrundlage für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

		Konventionelle ConWIP-Steuerung		Synchrone zweistufige Auftragsfreigabe	
		Vergleichsszenario		Referenzszenario	
		Sitztyp A	Sitztyp B	Sitztyp A	Sitztyp B
Geforderte Produktionsmenge	[# Sitze]	300	50	300	50
Mittlere Durchlaufzeit ZD_{L_m}	[hh:mm:ss]	01:40:51	01:26:45	01:37:01	01:09:40
Mittlerer Umlaufbestand WIP_m	[# Aufträge]	40		40	
Notwendige Produktionszeit	[hh:mm:ss]	16:18:24		15:06:13	

9 Technische Umsetzung und Validierung

Die Analyse der logistischen Kennzahlen zeigt, dass sich die Durchlaufzeiten, wie bereits in Abschnitt 9.3.2.3 diskutiert, durch die Implementierung der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe um 4 % (Sitztyp A) bzw. 20 % (Sitztyp B) reduzieren lassen. Dies ist der Grund für die um etwa 8 % geringere Produktionszeit, die im Falle des entwickelten situationsbasierten Auftragsfreigabeverfahrens notwendig ist, um das geforderte Produktionsprogramm von 300 Nutzfahrzeugsitzen vom Typ A und 50 vom Typ B fertigzustellen.

Die monetäre Bewertung dieser beispielhaften Umsetzung soll mit Hilfe der *Amortisationsrechnung* aus dem Bereich der statischen Investitionsrechnung vorgenommen werden. Dieses Verfahren gibt an, wie lange das Steuerungssystem betrieben werden muss, um die höheren Investitionskosten über die täglich erzielten Einsparungen zu refinanzieren. Diese Zeitspanne wird als *Amortisationszeit* bezeichnet (PAPE 2011). Zur Anwendung dieses Verfahrens müssen demzufolge die Investitionskosten der beiden zu vergleichenden Steuerungsansätze und deren jeweilige Betriebskosten ermittelt werden. Die täglichen Einsparungen resultieren zum einen aus diesen Betriebskosten und zum anderen aus den durch die kürzere Produktionszeit eingesparten Fertigungskosten.

Die einmaligen *Investitionskosten* setzen sich aus sach- und personenbezogenen Kosten zusammen. Bei der Steuerung unter Einsatz der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe ist die Implementierung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements erforderlich (vgl. Tabelle 14).

Tabelle 14: Investitionskosten zur Umsetzung der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe am Praxisbeispiel (geschätzt)

Einmalige Investitionskosten			
Sachkosten			
Typ	Menge	Kosten pro Stück [EUR]	Kosten [EUR]
RFID-Schreib-/Lesegerät	18	2.000,00	36.000,00
RFID-Antenne	18	600,00	10.800,00
RFID-Transponder	80	2,50	200,00
RFID-Applikationssoftware	1	5.000,00	5.000,00
Software (Datenbanken etc.)	2	20.000,00	40.000,00
Summe Sachkosten			92.000,00
Personalkosten			
Typ	Personentage (PT)	Kosten pro PT [EUR]	Kosten [EUR]
Hardware-Installationen	5	600,00	3.000,00
RFID-Konfiguration	10	1.200,00	12.000,00
Steuerungsassistenzsystem	40	1.200,00	48.000,00
Ereignisverwaltungssystem	20	1.200,00	24.000,00
SAS-Mitarbeiterdialog	20	1.200,00	24.000,00
Summe Personalkosten			111.000,00
Investitionskosten			203.000,00

Die Sachkosten umfassen in diesem Referenzfall vor allem die an jedem Produktionsmodul zu installierende RFID-Hardware (Schreib-/Lesegeräte, Antennen, Transponder) sowie zu beschaffenden Softwarelizenzen für die Umsetzung der zentralen und dezentralen Steuerungselemente. Sie können mit etwa 92.000 Euro

angesetzt werden. Die Personalkosten in Höhe von 111.000 Euro werden maßgeblich über die RFID-Konfiguration sowie die Implementierungsaufwände für das Steuerungsassistenzsystem, das Ereignisverwaltungssystem und die SAS-Mitarbeiterdialoge bestimmt. Die Investitionskosten für die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe umfassen somit 203.000 Euro.

Im Falle einer Auftragsfreigabe mittels der konventionellen ConWIP-Steuerung, die mit Karten betrieben werden soll, liegen diese Investitionskosten lediglich bei 3.120 Euro. Die Sachkosten sind hierbei für die ConWIP-Karten und notwendige Vorrichtungen mit 120 Euro anzusetzen. Die Personalkosten zur Hardwareinstallation und Initialisierung des Steuerungsverfahrens können mit 3.000 Euro überschlagen werden. Daraus ergibt sich eine Differenz der Investitionskosten von 199.880 Euro, die zum Einsatz der RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung zusätzlich aufgebracht werden muss (vgl. Tabelle 15).

Tabelle 15: Investitionskosten zur Umsetzung der konventionellen ConWIP-Steuerung am Praxisbeispiel (geschätzt)

Einmalige Investitionskosten			
Sachkosten			
Typ	Menge	Kosten pro Stück [EUR]	Kosten [EUR]
ConWIP-Karten	40	1	40,00
Vorrichtungen	4	20	80,00
Summe Sachkosten			120,00
Personalkosten			
Typ	Personentage (PT)	Kosten pro PT [EUR]	Kosten [EUR]
Hardware-Installationen	1	600	600,00
ConWIP-Initialisierung	2	1200	2.400,00
Summe Personalkosten			3.000,00
Investitionskosten			3.120,00

Die laufenden *Betriebskosten* im Referenzszenario betragen 52.905 Euro pro Jahr, denen bei einem Zweischichtbetrieb mit acht Stunden pro Schicht und 250 Arbeitstagen (4000 Stunden) im Jahr Betriebskosten von 13,23 Euro pro Stunde entsprechen. Diese ergeben sich vor allem aus den Kosten für die Pflege und Wartung der Softwaresysteme sowie der Initialisierung und dem Handling der RFID-Transponder. Die RFID-Transponder werden an jedem Sitzunterbau und jeder Rückenlehne zu Beginn der Montage angebracht und initialisiert. Nach Produktionsende werden diese entfernt und mit einem neuen Produktionsauftrag wiederverwendet, was nach FLEISCH et al. 2005 als Closed-Loop-Anwendung bezeichnet wird (vgl. Tabelle 16).

9 Technische Umsetzung und Validierung

Tabelle 16: Betriebskosten der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe am Praxisbeispiel (geschätzt)

Jährliche Betriebskosten			
Typ	Menge oder PT	Kosten pro Einheit [EUR]	Kosten [EUR]
Lizenzgebühren pro Jahr [Stück]	3	2.000,00	6.000,00
Pflege Steuerungsassistenzsystem [PT]	5	1.200,00	6.000,00
Pflege Ereignisverwaltungssystem [PT]	5	1.200,00	6.000,00
Pflege SAS-Mitarbeiterdialog [PT]	5	1.200,00	6.000,00
Ersatz-RFID-Transponder [Stück]	12	2,50	30,00
Tag-Initialisierung und Handling [Stück]	87.500	0,33	28.875,00
Energie	vernachlässigbar		
Betriebskosten pro Jahr:			52.905,00
Betriebskosten pro Stunde:			13,23

Das Vergleichsszenario weist Betriebskosten in Höhe von *5,26 Euro pro Stunde* auf, die sich vor allem aus dem Initialisierungsaufwand und dem Handling der ConWIP-Karten ergeben (vgl. Tabelle 17).

Tabelle 17: Betriebskosten der konventionellen ConWIP-Steuerung am Praxisbeispiel (geschätzt)

Jährliche Betriebskosten			
Typ	Menge oder PT	Kosten pro Einheit [EUR]	Kosten [EUR]
Ersatz-ConWIP-Karten [Stück]	36	1,00	36,00
Initialisierung und Handling [Stück]	87.500	0,24	21.000,00
Energie	vernachlässigbar		
Betriebskosten pro Jahr:			21.036,00
Betriebskosten pro Stunde:			5,26

Zur Bewertung des quantitativen Nutzens der RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung müssen in einem nächsten Schritt die Einsparungen ermittelt werden, die im vorliegenden Praxisbeispiel mit Hilfe der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe erzielt werden können. Die Einsparungen können geeignet über den geringeren zeitlichen Produktionsaufwand und die damit eingesparten Fertigungskosten gemessen werden. Die *Fertigungskosten* setzen sich aus den Fertigungseinzelkosten und den Fertigungsgemeinkosten zusammen.

Die *Fertigungseinzelkosten* bezeichnen die für ein gewisses Produktionsvolumen eingesetzten Personalkosten. In beiden Bewertungsszenarien wird von einer Produktionsmitarbeiteranzahl von 57 ausgegangen, wobei 49 Mitarbeiter dem Bereich Montage und acht Mitarbeiter dem Bereich Logistik zugeordnet werden können (vgl. Tabelle 18). Der Stundenlohn eines Montagemitarbeiters wird mit 30 Euro und der eines Logistikmitarbeiters mit 20 Euro angesetzt. Hieraus ergeben sich Fertigungseinzelkosten in Höhe von *1630 Euro pro Stunde*.

Tabelle 18: Spezifikation der Montageabschnitte (geschätzt)

	Anzahl Mitarbeiter	Anschaffungs- kosten [EUR]	Nutzfläche [m ²]	Betriebsstunden pro Jahr [h]	Stromverbrauch pro Jahr [kWh]
Sitzstrukturmontage	2	40.000	18	4.000	2.400
Lehnenstrukturmontage	2	40.000	18	4.000	2.400
Endmontage A	28	440.000	126	4.000	45.600
Endmontage B	2	60.000	18	4.000	9.600
Rückenlehnenmontage	8	140.000	36	4.000	19.200
Vormontage Sitzpolster	2	40.000	18	4.000	2.400
Vormontage Lehnenpolster	2	40.000	18	4.000	2.400
Risermontage	1	15.000	9	4.000	600
Qualitätssicherung	2	140.000	36	4.000	9.600
Logistik	8			4.000	
Gesamt:	57	955.000	297	4.000	94.200

Die *Fertigungsgemeinkosten* zur Herstellung der Nutzfahrzeugsitze lassen sich über den *Maschinenstundensatz* nach VDI (1992) bestimmen. Hierzu werden die Anschaffungskosten mit den Wiederbeschaffungskosten gleichgesetzt und mit 955.000 Euro überschlägig festgelegt. Davon fallen etwa 70 % des Wertes auf die automatisiert getakteten Montagelinien der Rückenlehnenmontage und der Endmontage vom Sitztyp A sowie die mit hochwertigen Prüfmitteln ausgestattete Qualitätssicherung. Der Restwert für die gesamte Anlage wird nach einer Nutzungsdauer von 10 Jahren mit einem Wert von null Euro angesetzt, woraus sich bei linearerem Vorgehen Abschreibungsaufwände von 95.500 Euro pro Jahr ergeben. Der jährliche Instandhaltungsaufwand wird mit 5 % der Anschaffungskosten überschlagen, dem 47.750 Euro pro Jahr entsprechen. Die kalkulatorischen Zinsen für die Montageanlage werden ebenfalls mit 5 % angesetzt und umfassen damit 23.875 Euro pro Jahr. Der Platzbedarf der Montageabschnitte wird mit 297 m² kalkuliert, dem bei 15 Euro pro Quadratmeter und Monat eine Raummiete von 53.460 Euro pro Jahr entspricht. Der jährliche Energieaufwand wird auf 94.200 kWh geschätzt, dem bei einem Strompreis von 0,18 Euro pro Kilowattstunde Energiekosten von 16.956 Euro pro Jahr gegenüberstehen. Der Maschinenstundensatz bezeichnet den Quotienten aus der Summe dieser jährlichen Kosten und der Laufzeit von 4000 Stunden pro Jahr und beträgt in dem vorliegenden Praxisbeispiel folglich 59,39 Euro pro Stunde (vgl. Tabelle 19).

Tabelle 19: Berechnung des Maschinenstundensatzes

	Kosten pro Jahr in [EUR] für:					Maschinen- stundensatz [EUR]
	Strom	Raum	Ab- schreibung	Instand- haltung	Zinsen	
Sitzstrukturmontage	432	3.240	4.000	2.000	1.000	2,67
Lehnenstrukturmontage	432	3.240	4.000	2.000	1.000	2,67
Endmontage A	8.208	22.680	44.000	22.000	11.000	26,97
Endmontage B	1.728	3.240	6.000	3.000	1.500	3,87
Rückenlehnenmontage	3.456	6.480	14.000	7.000	3.500	8,61
Vormontage Sitzpolster	432	3.240	4.000	2.000	1.000	2,67
Vormontage Lehnenpolster	432	3.240	4.000	2.000	1.000	2,67
Risermontage	108	1.620	1.500	750	375	1,09
Qualitätssicherung	1.728	6.480	14.000	7.000	3.500	8,18
Gesamt:	16.956	53.460	95.500	47.750	23.875	59,39

9 Technische Umsetzung und Validierung

Zur Bestimmung des monetären Nutzens der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe müssen die täglichen Einsparungen im Vergleich zur konventionellen ConWIP-Steuerung ermittelt werden. Zur Produktion des täglichen Mindestdurchsatzes von 300 Nutzfahrzeugsitzen vom Typ A und 50 vom Typ B benötigt das Referenzszenario unter Einsatz des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements und der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe 15 Stunden und 6 Minuten. Dem stehen Fertigungseinzelkosten von 24.613 Euro und Fertigungsgemeinkosten von 896,72 Euro gegenüber. Die Betriebskosten des Steuerungssystems betragen bei diesem Referenzszenario 199,72 Euro und die laufenden Gesamtkosten somit 25.709,43 Euro. Das Vergleichsszenario benötigt mit Hilfe der kartenbasierten ConWIP-Steuerung 16 Stunden und 18 Minuten zur Herstellung des festgelegten Produktionsprogrammes. Hierfür sind Fertigungseinzelkosten von 26.569 Euro und Fertigungsgemeinkosten von 967,98 Euro aufzubringen. Die Betriebskosten der konventionellen ConWIP-Steuerung betragen in diesem Fall 85,72 Euro und die laufenden Gesamtkosten damit 27.622,70 Euro. Daraus resultiert bei der Umsetzung des entwickelten Steuerungssystems eine tägliche Ersparnis von 1913,27 Euro in Bezug auf die Produktion des geforderten Mindestdurchsatzes.

Die Berechnung der *Amortisationszeit* t_A für das vorliegende Praxisbeispiel erfolgt durch die Bildung des Quotienten aus der Differenz der Investitionskosten für die beiden Steuerungsansätze (199.880 Euro) und der täglichen Einsparung durch die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe (1913,27 Euro) bei der Produktion des geforderten Mindestdurchsatzes:

$$t_A = \frac{199.880,00 \text{ Euro}}{1913,27 \text{ Euro pro Tag}} \approx 105 \text{ Tage} \quad (31)$$

mit t_A Amortisationszeit [d]

Die Amortisationszeit für das System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung liegt in dem vorliegenden Praxisbeispiel bei etwa 105 *Produktionstagen*. Dies entspricht einer ungefähren Einsatzzeit des Steuerungssystems von fünf Monaten. Nach dieser Zeitspanne hat sich der höhere Investitionsaufwand über die täglich eingesparten Kosten vollständig refinanziert, was als akzeptable Amortisationszeit bezeichnet werden kann (Pape 2011).

Die Bewertungen im Rahmen des vorliegenden Abschnitts haben gezeigt, dass das System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung den Anforderungen an eine zeitgemäße Steuerung von Produktionsabläufen genügt. Darüber hinaus wurde dargestellt, dass zur vollständigen monetären Bewertung dieses Steuerungssystems die Erfassung und Analyse sämtlicher unternehmensspezifischer Kosten und Nutzenpotenziale im konkreten Anwendungsfall erforderlich sind. Dennoch konnte am Praxisbeispiel der vorgestellten Nutzfahrzeug-

sitzmontage eine erfolgreiche Wirtschaftlichkeitsbetrachtung des Steuerungssystems durchgeführt werden.

9.5 Fazit

Die technische Umsetzung, die simulationsbasierte und anforderungsbezogene Validierung sowie die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung haben gezeigt, dass das entwickelte System in der Lage ist, Produktionsabläufe in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage situationsbasiert und zielgerichtet zu steuern. Die steuerungorientierte Produktionsmodularisierung legt dafür die betriebsorganisatorische Basis. Die zentralen und dezentralen Steuerungselemente des RFID-basierten hybriden Informationsmanagement schaffen wiederum die informationstechnische Grundlage zur situationsbasierten Ausführung der Steuerungsvorfahren, die die Erreichung der logistischen Zielgrößen gewährleisten.

10 Schlussbetrachtung

10.1 Zusammenfassung

Zu Beginn der vorliegenden Arbeit wird das turbulente Umfeld, in dem produzierende Unternehmen heute agieren, vorgestellt. Dieses ist durch eine zunehmende Produktindividualisierung, den Wunsch nach kurzen Lieferzeiten und hohe Flexibilitätserfordernisse geprägt. Die Herstellung kundenindividueller Produkte zeichnet sich durch steigende Variantenzahlen und kleine Losgrößen aus, was eine zunehmende Komplexität in der Planung, Steuerung und Durchführung der heterogenen Abläufe in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage hervorruft. Durch eine zielgerichtete Ausführung der Produktionssteuerung kann dieser Komplexität geeignet begegnet und die Erreichung der logistischen Leistungsziele gewährleistet werden. Eine effektive Produktionssteuerung hängt jedoch maßgeblich von einer hohen Transparenz hinsichtlich der aktuellen Produktionssituation ab. Die RFID-Technologie gilt in diesem Zusammenhang als eine vielversprechende Möglichkeit zur Schaffung einer adäquaten Informationsbasis und damit zur erfolgreichen Erfüllung der definierten Steuerungsaufgaben.

Vor dem Hintergrund dieser Rahmenbedingungen werden die Anforderungen an eine zeitgemäße Produktionssteuerung formuliert und der Stand der Forschung und Technik in den Themenfeldern Verfahren und Organisationsstrukturen in der Produktionssteuerung analysiert. Darüber hinaus werden Ansätze zur Modellierung und Speicherung von steuerungrelevanten Informationen charakterisiert, wobei der Fokus auf auftrags- und produktbezogene Daten gerichtet ist. Es folgt die Ableitung des Handlungsbedarfs und die übersichtliche Vorstellung des zu entwickelnden Systems zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung. Aufgrund der resultierenden Problemstruktur besteht das Steuerungssystem aus den folgenden drei, aufeinander aufbauenden Systemelementen:

- Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung
- RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement
- Situationsbasierte Steuerungsverfahren

Die steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung basiert auf produkt-, ressourcen- und steuerungsbefugten Modularisierungsprinzipien und erlaubt damit die strukturierte und logische Zusammenfassung von Arbeitssystemen zu Produktionsmodulen aus Sicht der Produktionssteuerung. Dieses Systemelement legt damit die betriebsorganisatorische Basis für situationsbasierte Steuerungsentscheidungen.

Das RFID-basierte hybride Informationsmanagement stellt als Referenzarchitektur die informationstechnische Basis des Steuerungssystems dar und besteht aus

den zentralen Steuerungselementen Steuerungsassistenzsystem und Ereignisverwaltungssystem. Die Referenzarchitektur wird durch die dezentralen Steuerungselemente SAS-Mitarbeiterdialog und intelligentes Produkt komplettiert und in Anlehnung an anerkannte Definitionen, Richtlinien und Standards detailliert. Die Abbildung des steuerungsrelevanten Auftragsstatus und Produktzustands erfolgt ebenfalls im Rahmen dieses Systemelements durch die Spezifikation der notwendigen Daten und Datenstrukturen.

Kern des Steuerungssystems bilden die situationsbasierten Steuerungsverfahren, die die Aufgaben der Produktionssteuerung adressieren und deren ganzheitliche und situationsbasierte Ausführung sicherstellen. Hierzu zählt die synchrone zweistufige Auftragsfreigabe, die in der Lage ist, die Bearbeitungsschritte von zuvor definierten Haupt- und Nebekomponenten eines zu montierenden Produktes zu synchronisieren und dabei Durchlaufzeiten in der Produktion zu reduzieren. Darüber hinaus wird die situationsbasierte Reihenfolgebildung mit intermodularer Schlupfzeitverteilung eingeführt, die eine terminorientierte Auftragssequenzierung auf der Modulebene erlaubt. Zudem stellt die intramodulare Rückstandsregelung eine betriebsparallele Rückstandsmessung und die Ad-hoc-Kapazitätsanpassung im Falle rückständiger Produktionsaufträge sicher.

Die Umsetzung des RFID-basierten hybriden Informationsmanagements in der Automobilindustrie und die Implementierung der Steuerungsverfahren in einer produktionstechnischen Versuchsanlage unter Einsatz des Softwareproduktes SAP ME zeigen, dass die situationsbasierte Steuerung von Produktionsabläufen mit den vorgestellten Systemelementen technisch möglich ist. Die potenzielle Verbesserung der logistischen Zielgrößen durch das Steuerungssystem wird mit Hilfe der Ablaufsimulation belegt, bei der die Leistungsfähigkeit der entwickelten Steuerungsverfahren mit der einer konventionellen Produktionssteuerung verglichen wird. Abschließend wird dargestellt, dass das System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung den Anforderungen an eine zeitgemäße Steuerung von Abläufen in der Fertigung und Montage genügt und dass dessen Umsetzung wirtschaftlich möglich ist.

10.2 Ausblick

Das im Rahmen der vorliegenden Arbeit geschaffene System wurde für die situationsbasierte Steuerung innerbetrieblicher Produktionsabläufe entwickelt. Die notwendige Informationsbasis der Steuerungsverfahren wird durch das RFID-basierte hybride Informationsmanagement bereitgestellt. Eine Erweiterung des Anwendungsbereiches dieses Informationsmanagements eröffnet zusätzliche Forschungsfelder.

Die Schaffung einer unternehmensübergreifenden Schnittstelle des Ereignisverwaltungssystems und die darauf aufbauende informationstechnische Vernetzung mit anderen Unternehmen werden als vielversprechende Grundlage für eine überbetriebliche Optimierung von Produktionsabläufen, ein effizientes Störungsmanagement und die Entwicklung eines ereignisbasierten Frühwarnsystems verstanden. Für Letzteres haben die produktspezifischen Ereignis-Daten und deren Möglichkeit zur Abbildung qualitativer und quantitativer Qualitätsmerkmale besondere Relevanz, da auf sie beispielsweise die Methoden der statistischen Prozessregelung (SPC) gezielt angewandt werden können.

Zusätzlich wird vorgeschlagen, das System zu erweitern und im Speziellen das intelligente Produkt einzusetzen, um produktspezifische Betriebsdaten während des individuellen Produktionsablaufes zu sammeln und der Produktionsplanung zur kontinuierlichen, erfahrungsbasierten Aktualisierung von Stammdaten zur Verfügung zu stellen. In diesem Zusammenhang gilt es insbesondere die Techniken des Knowledge Discovery in Databases (KDD) zu adaptieren und im Hinblick auf eine realistischere Maschinenbelegungsplanung einzusetzen.

11 Literaturverzeichnis

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. München: Carl Hanser 2011. ISBN: 9783446425958.

ABRAMOVICI et al. 2009

Abramovici, M.; Bellalouna, F.; Flohr, M.: Open-Loop Einsatz von RFID im industriellen Bereich. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 3, S. 200–205.

ADAM 2001

Adam, D.: Produktions-Management. 9. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2001. ISBN: 3409691170.

ANDERL & TRIPPNER 2000

Anderl, R.; Trippner, D.: STEP - Standard for the Exchange of Product Model Data: eine Einführung in die Entwicklung, Implementierung und industrielle Nutzung der Normenreihe ISO 10303 (STEP). Stuttgart: Teubner 2000. ISBN: 3519063778.

ARNOLD et al. 2008

Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Furmans, K.; Tempelmeier, H. (Hrsg.): Handbuch Logistik (VDI-Buch). 3. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 9783540729280.

BACHER et al. 2010

Bacher, J.; Pöge, A.; Wenzig, K.: Clusteranalyse: Anwendungsorientierte Einführung in Klassifikationsverfahren. 3. Aufl. München: Oldenbourg 2010. ISBN: 9783486584578.

BAUMBERGER 2007

Baumberger, G.: Methoden zur kundenspezifischen Produktdefinition bei individualisierten Produkten. Diss. Technische Universität München. München: Verlag Dr. Hut 2007.

BECHTE 1984

Bechte, W.: Steuerung der Durchlaufzeit durch belastungsorientierte Auftragsfreigabe bei Werkstattfertigung. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 1984 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Nr. 70).

BECKERT & HUDETZ 2002

Beckert, B.; Hudetz, W.: Stand und Potenzial produktionsnaher Datenverarbeitung. PPS Management 7 (2002) 2, S. 35–39.

BEGEMANN 2005

Begemann, C.: Terminorientierte Kapazitätssteuerung in der Fertigung. Diss. Universität Hannover. Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2005 (Berichte aus dem IFA, Band 02/2005).

BIENIEK 2001

Bieniek, C.: Prozeßorientierte Produktkonfiguration zur integrierten Auftragsabwicklung bei Variantenfertigern. Diss. Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Aachen: Shaker 2001 (Schriftenreihe des IFU, Nr. 1).

BIETHAHN et al. 2004

Biethahn, J.; Mucksch, H.; Ruf, W.: Ganzheitliches Informationsmanagement - Band 1: Grundlagen. 6. Aufl. München: Oldenbourg 2004. ISBN: 3486200208.

BLUNCK & WINDT 2013

Blunck, H.; Windt, K.: Komplexität schafft Spielraum für Selbststeuerung. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2, S. 109–113.

BONGAERTS et al. 2000

Bongaerts, L.; Monostori, L.; McFarlane, D.; Kádár, B.: Hierarchy in Distributed Shop Floor Control. Computers in Industry 43 (2000) 2, S. 123–137.

BÖSE & WINDT 2007

Böse, F.; Windt, K.: Catalogue of Criteria for Autonomous Control in Logistics. In: Hülsmann, M. et al. (Hrsg.): Understanding Autonomous Cooperation and Control in Logistics: The Impact of Autonomy on Mananagement, Information, Communication and Material Flow. Berlin: Springer 2007, S. 57–72. ISBN: 9783540474494.

BREITHAUPT 2001

Breithaupt, J.-W.: Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbe-reichen. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001. ISBN: 9783183571024.

BRINZER 2005

Brinzer, B.: Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2005 (ISW Forschung und Praxis, Nr. 154).

BRINZER et al. 2005

Brinzer, B.; Priese, J.; Klemm, P.; Pritschow, G.: Neue Ansätze zur dezentralen Produktionsregelung. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 4, S. 275–281.

BSI - BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT IN DER INFORMATIONSTECHNIK 2004

BSI - Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Risiken und Chancen des Einsatzes von RFID-Systemen: Trends und Entwicklungen in Technologien, Anwendungen und Sicherheit. Ingelheim: SecuMedia 2004. ISBN: 392274656X.

CHEMNITZ et al. 2010

Chemnitz, M.; Krüger, J.; Patzlaff, M.; Tuguldur, E.-O.: SOPRO - Advancements in the Self-Organising Production. In: IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Bilbao, Spain: IEEE 2010, S. 1–4.

DENKENA et al. 2005

Denkena, B.; Hasenfuß, K.; Liedtke, C.: Gentelligente Bauteile - Genetik und Intelligenz in der Produktionstechnik. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 100 (2005) 10, S. 569–572.

DENKENA et al. 2012

Denkena, B.; Lorenzen, L.-E.; Schmidt, J.: Adaptive Process Planning. Production Engineering - Research and Development 6 (2012), S. 55–67.

DENKENA et al. 2013

Denkena, B.; Boujnah, H.; Henning, H.; Mörke, T.; Schmidt, J.; Meyer, J.: Anwendungspotentiale intelligenter Bauteile. wt Werkstatttechnik online 103 (2013) 2, S. 152–156.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 1972

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

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 1982

Deutsches Institut für Normung (DIN) e. V.: DIN 53804, Teil 3: Statistische Auswertungen; Ordinalmerkmale. Berlin: Beuth 1982.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 1985a

Deutsches Institut für Normung (DIN) e. V.: DIN 53804, Teil 2: Statistische Auswertungen; Zählbare (diskrete Merkmale). Berlin: Beuth 1985.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 1985b

Deutsches Institut für Normung (DIN) e. V.: DIN 53804, Teil 4: Statistische Auswertungen; Attributmerkmale. Berlin: Beuth 1985.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 1990

Deutsches Institut für Normung (DIN) e. V.: DIN 6789, Teil 2: Dokumentationssystematik - Dokumentensätze Technischer Produktdokumentationen. Berlin: Beuth 1990.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 2007

Deutsches Institut für Normung (DIN) e. V.: DIN 53804, Teil 1: Statistische Auswertungen; Kontinuierliche Merkmale. Berlin: Beuth 2007.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 2003

Deutsches Institut für Normung (DIN) e. V.: DIN 8580: Fertigerungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E. V. 2006

Deutsches Institut für Normung (DIN) e. V.: DIN ISO 8601:2006-09 Datenelemente und Austauschformate - Informationsaustausch - Darstellung von Datum und Uhrzeit. Berlin: Beuth 2006.

DIEKMANN et al. 2007

Diekmann, T.; Melski, A.; Schumann, M.: Data-on-Network vs. Data-on-Tag: Managing Data in Complex RFID Environments. Proceedings of the 40th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'07). Hawaii, USA: 2007.

DIPPOLD et al. 2005

Dippold, R.; Meier, A.; Ringgenberg, A.; Schnider, W.; Schwinn, K.: Unternehmensweites Datenmanagement: Von der Datenbankadministration bis zum Informationsmanagement. 4. Aufl. Braunschweig: Vieweg 2005. ISBN: 28356618.

DYLA 2002

Dyla, A.: Modell einer durchgängigen rechnerbasierten Produktentwicklung. Diss. Technische Universität München. 2002.
<<http://mediatum.ub.tum.de/doc/601853/601853.pdf>> - zuletzt geprüft 28.05.2014.

EIGNER & STELZER 2009

Eigner, M.; Stelzer, R.: Product Lifecycle Management: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. 2. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783540443735.

ELMARAGHY et al. 2012

ElMaraghy, W.; ElMaraghy, H.; Tomiyama, T.; Monostori, L.: Complexity in Engineering Design and Manufacturing. Annals of the CIRP 61 (2012) 2, S. 793–814.

ENGELHARDT & REINHART 2012

Engelhardt, P.; Reinhart, G.: Approach for an RFID-based Situational Shop Floor Control. Proceedings of the 2012 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2012). Hongkong, China: 2012.

ENGELHARDT et al. 2013

Engelhardt, P.; Weidner, M.; Einsank, W.; Reinhart, G.: Situationsbasierte Steuerung modularisierter Produktionsabläufe. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 108 (2013) 12, S. 987–991.

ENGELHARDT et al. 2014

Engelhardt, P.; Weidner, M.; Einsank, W.; Reinhart, G.: Anforderungsgerechte Schlupfzeitverteilung zur situationsbasierten Reihenfolgebildung. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 12, S. 909–914.

ERLENKÖTTER 2003

Erlenkötter, H.: XML: Extensible Markup Language von Anfang an. 3. Aufl. Reinbeck: Rowohlt Taschenbuch Verlag 2003. ISBN 9783499612091.

EVERSHEIM et al. 1996

Eversheim, W.; Maßberg, W.; Pritschow, G.; Tönshoff, H. K.: Prozessgestaltung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management: Betriebshütte. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 7-73–7-123. ISBN: 0387593608.

EVERSHEIM & SCHUH 2005

Eversheim, W.; Schuh, G.: Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin: Springer 2005. ISBN: 9783540269465.

FELDMANN 1997

Feldmann, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Diss. Technische Universität München. Berlin: Springer 1997 (Forschungsberichte *iwb* 104).

FINKENZELLER 2008

Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. 5. Aufl. München: Carl Hanser 2008. ISBN: 9783446412002.

FLEISCH et al. 2005

Fleisch, E.; Christ, O.; Dierkes, M.: Die betriebswirtschaftliche Vision des Internets der Dinge. In: Fleisch, E. et al. (Hrsg.): Das Internet der Dinge: Ubiquitous computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen. Berlin: Springer 2005, S. 3–37. ISBN: 3540240039.

FLEISCHMANN et al. 2008

Fleischmann, B.; Meyr, H.; Wagner, M.: Advanced Planning. In: Stadler, H.; Kilger, C. (Hrsg.): Supply Chain Management and Advanced Planning : Concepts, Models, Software and Case Studies. 4. Aufl. Berlin: Springer 2008, S. 81–106. ISBN: 9783540745112.

FRANKE 2002

Franke, H.-J.: Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung. München: Carl Hanser 2002. ISBN: 3446217304.

FRESE 2005

Frese, E.: Grundlagen der Organisation: Entscheidungsorientiertes Konzept der Organisationsgestaltung. 9. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2005. ISBN: 3409126813.

FUCHS 2013

Fuchs, S.: Wertstromorientierte Auftragsfreigabe bei dynamischen Engpässen in der Produktion nach dem Werkstattprinzip. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Apprimus 2013 (Ergebnisse aus der Produktionstechnik, Band 16/2013).

GECK-MÜGGE & WIEDENMANN 1993

Geck-Mügge, K.; Wiedenmann, H.: Das Informationsmodell der Fertigungssteuerung. In: Dangelmaier, W. et al. (Hrsg.): Modell der Fertigungssteuerung. Berlin: Beuth 1993, S. 9–68. ISBN: 3410129227.

GRIMMER & MUCHA 1998

Grimmer, U.; Mucha, H.-J.: Datensegmentierung mittels Clusteranalyse. In: Nakhaeizadeh, G. (Hrsg.): Data Mining: Theoretische Aspekte und Anwendungen. Heidelberg: Physica-Verlag 1998, S. 109–141. ISBN: 9783790810530.

GRUNWALD 2002

Grunwald, S.: Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2002 (Forschungsberichte *iwb* 159).

GS1-STANDARD 2007

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

GS1-STANDARD 2011

GS1 EPC Tag Data Standard 1.6. Brüssel, Belgien: GS1 AISBL 2011.

GUTENBERG 1976

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Band 1: Die Produktion. 22. Aufl. Berlin: Springer 1976. ISBN: 3540056947.

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2009

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 8. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783642003790.

GÜNTHER et al. 2008

Günther, O. P.; Kletti, W.; Kubach, U.: RFID in Manufacturing. Berlin: Springer 2008. ISBN: 9783540764533.

HACKSTEIN 1984

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis. Düsseldorf: VDI-Verlag 1984. ISBN: 3184006107.

HASTIE et al. 2009

Hastie, T.; Tibshirani, R.; Friedman, J.: The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference and Prediction. 2. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9780387848570.

HAUERTMANN 1998

Hauertmann, W.: Simulationsgestützte projektive Auslegung von Gruppenarbeitssystemen in Bezug auf Flexibilität, Autonomie und Leistung. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 1998 (Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Band 11).

HEIDERICH 2001

Heiderich, T.: Informationsflüsse nach ungeplanten Ereignissen in der technischen Auftragsabwicklung. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 2001 (Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Band 40).

HELBING 2010

Helbing, K.: Handbuch Fabrikprojektierung. Berlin: Springer 2010. ISBN: 9783642016172.

HELLMICH 2003

Hellmich, K. P.: Kundenorientierte Auftragsabwicklung: Engpassorientierte Planung und Steuerung des Ressourceneinsatzes. Diss. Technische Universität Cottbus. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2003 (Gabler Edition Wissenschaft).

HERNÁNDEZ 2003

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikplanung. Düsseldorf: VDI-Verlag 2003. ISBN: 9783183149162.

HIGUERA & MONTALYO 2007

Higuera, A. G.; Montalyo, A. C.: RFID-Enhanced Multi-Agent Based Control for a Machining System. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems* 19 (2007) 1, S. 41–61.

HILDEBRAND 2001

Hildebrand, K.: *Informationsmanagement: Wettbewerbsorientierte Informationsverarbeitung mit Standard-Software und Internet*. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2001. ISBN: 3486256084.

HOPP & SPEARMAN 2004

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: To Pull or Not to Pull: What is the Question? *Manufacturing & Service Operations Management* 6 (2004) 2, S. 133–148.

HOPP & SPEARMAN 2011

Hopp, W. J.; Spearman, M. L.: *Factory Physics*. 3. Aufl. Long Grove, USA: Waveland Press 2011. ISBN: 9781577667391.

HORN et al. 2013

Horn, S.; Claus, A.; Neidig, J.; Kiesel, B.; Hansen, T.; Hauptert, J.: The SEMPROM Data Format. In: Wahlster, W. (Hrsg.): *SemProM: Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things*. Berlin: Springer 2013, S. 127–148. ISBN: 9783642373763.

HÖGE 1995

Höge, R.: *Organisatorische Segmentierung. Ein Instrument zur Komplexitäts-handhabung*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1995. ISBN: 9783824461875.

HUANG et al. 2007

Huang, G. Q.; Zhang, Q. L.; Jiang, P. Y.: RFID-based Wireless Manufacturing for Real-Time Management of Job Shop WIP Inventories. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33 (2007) 7–8, S. 752–764.

HUANG et al. 2008a

Huang, G. Q.; Ho, O. K. W.; Zhang, Q. L.; Xu, F. J.: RFID-enabled Smart Objects for Real-Time Reconfigurable Manufacturing. In: 5th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET 2008). 22.–24.10.2008. Nantes, Frankreich: Publibook 2008, S. 163–179.

HUANG et al. 2008b

Huang, G. Q.; Zhang, Y. F.; Chen, X.; Newman, S. T.: RFID-enabled Real-Time Wireless Manufacturing for Adaptive Assembly Planning and Control. *Journal of Intelligent Manufacturing* 19 (2008) 6, S. 701–713.

HUANG et al. 2009

Huang, G. Q.; Wright, P. K.; Newman, S. T.: *Wireless Manufacturing: a Literature Review, Recent Developments and Case Studies*. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 22 (2009) 7, S. 579–594.

HUANG et al. 2011

Huang, G. Q.; Qua, T.; Fang, M. J.; Bramley, A. N.: RFID-enabled Gateway Product Service System for Collaborative Manufacturing Alliances. *Annals of the CIRP* 60 (2011) 1, S. 465–468.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 1996

International Organization for Standardization (ISO): ISO 10303-1: Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdarstellung und -austausch - Teil 1: Überblick und grundlegende Prinzipien. Berlin: Beuth 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 2004a

International Organization for Standardization (ISO): ISO/IEC 15961: Information Technology - Radio Frequency Identification (RFID) for Item Management - Data Protocol: Application Interface. Berlin: Beuth 2004.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 2004b

International Organization for Standardization (ISO): ISO/IEC 15962: Information Technology - Radio Frequency Identification (RFID) for Item Management - Data Protocol: Data Encoding Rules and Logical Memory Functions. Berlin: Beuth 2004.

JÄGER et al. 2001

Jäger, B.; Wodny, M.; Rudolph, P. E.; Patschinsky, D.: Clusteranalyse mit Binärdaten. *Proceedings der 5. Konferenz der SAS-Anwender in Forschung und Entwicklung (KSFE 2001)*. Hohenheim: 2001.

JOINT AUTOMOTIVE INDUSTRY FORUM 2011

JAIF (Joint Automotive Industry Forum) Global Radio Frequency Identification (RFID) Item Level Standard. Southfield, USA: Automotive Industry Action Group (AIAG) 2011.

JÜNEMANN & BEYER 1998

Jünemann, R.; Beyer, A.: *Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen*. 2. Aufl. Berlin: Springer 1998. ISBN: 3540645144.

KAGERMANN et al. 2013

Kagermann, H.; Wahlster, W.; Helbig, J. (Hrsg.): *Deutschlands Zukunft als Produktionsstandort sichern - Umsetzungsempfehlungen für das Zukunftsprojekt Industrie 4.0 - Abschlussbericht des Arbeitskreises Industrie 4.0*. Berlin, München: Forschungsunion im Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft e. V., acatach – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e. V. 2013.

KERN 2007

Kern, C.: *Anwendung von RFID-Systemen*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 3540444777.

KIESEWETTER 1991

Kiesewetter, S.: *Entwicklung einer dynamisch adaptierbaren Produktionsregelung: dezentrale, hierarchische Regelung operativer Produktionsabläufe*. Diss. RWTH Aachen 1991.

KLEINERT & SONTOW 2010

Kleinert, A.; Sontow, K.: MES-Lösungen: Ersatz oder Ergänzung von ERP/PPS-Systemen? *PRODUCTIVITY Management* 15 (2010) 2, S. 29–32.

KLETTI 2006

Kletti, J.: MES - Manufacturing Execution System: Moderne Informationstechnologie zur Prozessfähigkeit der Wertschöpfung. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3540280103.

KLINGER & WENZEL 2000

Klinger, A.; Wenzel, S.: Referenzmodelle - Begriffsbestimmung und Klassifikation. In: Wenzel, S. (Hrsg.): Referenzmodelle für die Simulation in Produktion und Logistik. Gent, Belgien: Society for Computer Simulation International 2000, S. 13–29. ISBN: 1565551826.

KLUBMANN 2009

Klubbmann, J. H.: Einsatzpotenziale des Mobile Computing in der Produktionslogistik von Auftragsfertigern. Diss. Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2009 (Berichte aus dem IPH, Band 02/2009).

KNOCHE 2005

Knoche, K.: Generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 2005 (Berichte aus der Produktionstechnik, Band 5).

KOIKE et al. 2008

Koike, M.; Tsumaya, A.; Matsui, R.; Morinaga, E.; Wakamatsu, H.; Arai, E.: Production Scheduling System with Dynamic Lot Size in Case of Considering Set-up Time. In: Mitsuishi, M. et al. (Hrsg.): *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*. London, Großbritannien: Springer 2008, S. 289–292. ISBN: 9781848002678.

KRÄKEL 2007

Kräkel, M.: *Organisation und Management*. 3. Aufl. Tübingen: Mohr Siebeck 2007. ISBN: 9783161492587.

KRCMAR 2005

Krcmar, H.: *Informationsmanagement*. 4. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 9783540230151.

KURBEL 2005

Kurbel, K.: *Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management*. 6. Aufl. München: Oldenbourg 2005. ISBN: 3486575783.

KÜNZEL 2012

Künzel, H.: *Interne Kunden-Lieferanten-Beziehungen*. In: Künzel, H. (Hrsg.): *Erfolgsfaktor Kundenzufriedenheit*. Berlin: Springer 2012, S. 99–115. ISBN: 9783642325526.

LANZA & MOSER 2012

Lanza, G.; Moser, R.: Strategic Planning of Global Changeable Production Networks. 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Athen, Griechenland, 16.–18.05.2012.

LANZA et al. 2013

Lanza, G.; Stricker, N.; Peters, S.: Ad-hoc Rescheduling and Innovative Business Models for Shock-Robust Production Systems. 46th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Setubal, Portugal, 29.–31.05.2013.

LASSEN 2006

Lassen, S.: Gestaltung der Informationsflüsse der Auftragskoordination in Lieferketten mit hybriden Produktionsstrukturen. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 2006 (Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Band 80).

LAY et al. 2009

Lay, G.; Kinkel, S.; Jäger, A.: Stellhebel für mehr Produktivität – Benchmarking identifiziert Potenziale zur Steigerung der Produktivität. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung (ISI) 2009.

LEE et al. 1993

Lee, J. K.; Suh, M. S.; Fox, M. S.: Contingencies for the Design of Scheduling Expert Systems. *Expert Systems with Applications* 6 (1993) 3, S. 219–230.

LIN & SOLBERG 1994

Lin, G. Y.; Solberg, J. J.: Autonomous Control for Open Manufacturing Systems. In: Joshi S. B. et al. (Hrsg.): *Computer Control of Flexible Manufacturing Systems: Research and Development*, London, Großbritannien: Chapman & Hall 1994, S. 169–205. ISBN: 0412562006.

LINDEMANN et al. 2006

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F.: Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540342748.

LIU et al. 2005

Liu, M.; Zhang, Q.; Ni, L.; Tseng, M.: An RFID-Based Distributed Control System for Mass Customization Manufacturing. In: Cao, J. et al. (Hrsg.): *Parallel and Distributed Processing and Applications*. Berlin: Springer 2005, S. 1039–1049. ISBN: 3540241280.

LOPITZSCH 2005

Lopitzsch, J. R.: Segmentierte adaptive Fertigungssteuerung. Diss. Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2005 (Berichte aus dem IFA, Band 03/2005).

LÖDDING 2001

Lödding, H.: Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Nr. 587).

LÖDDING 2008

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 3540768599.

MARTIN 1998

Martin, C.: Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz. Diss. Technische Universität München. Berlin: Springer 1998. ISBN: 9783540644019.

MATHAR & SCHEURING 2009

Mathar, H.-J.; Scheuring, J.: Unternehmenslogistik: Grundlagen für die betriebliche Praxis mit zahlreichen Beispielen, Repetitionsfragen und Antworten. Zürich, Schweiz: Compendio Bildungsmedien 2009. ISBN: 9783715593470.

MÄRTENS et al. 2007

Märtens, A.; Elsweiler, M.; Nickel, R.: Adaptive, dezentrale Produktionssteuerung. *wt Werkstattstechnik online* 97 (2007) 6, S. 471–478.

McFARLANE et al. 2003

McFarlane, D. C.; Sarma, S.; Chirn, J. L.; Wong, C. Y.; Ashton, K.: Auto-ID Systems and Intelligent Manufacturing Control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 16 (2003) 4, S. 365–376.

MELSKI & SCHUMANN 2008

Melski, A.; Schumann, M.: Konzeptuelles Modell zur objektbegleitenden Datenspeicherung in RFID-gestützten Logistiknetzwerken. Göttingen: Georg-August-Universität Göttingen 2008. (Arbeitsbericht des Instituts für Wirtschaftsinformatik, Professur für Anwendungssysteme und E-Business Nr. 3/2008).

MERTENS 1996

Mertens, P.: Funktionen und Phasen der Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): *Produktion und Management: Betriebshütte*. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 14-11–14-59. ISBN: 0387593608.

MONOSTORI et al. 2006

Monostori, L.; Váncza, J.; Kumara, S.: Agent-Based Systems for Manufacturing. *Annals of the CIRP* 55 (2006) 2, S. 697–719.

MÜLLER 2004

Müller, E. (Hrsg.): *Integration der Transpondertechnologie zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit der operativen Produktionssteuerung*. Chemnitz: Institut für Betriebswissenschaften und Fabrikssysteme der TU Chemnitz 2004. ISSN: 09472495.

MÜLLER 2005

Müller, M.: *Informationstransfer im Supply Chain Management*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag 2005. ISBN: 9783835000261.

MÜLLER 2008

Müller, S.: *Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen*. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2008 (Forschungsberichte *iwb* 209).

NYHUIS & WIENDAHL 2003

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien: Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 2. Aufl. Berlin: Springer 2003. ISBN: 3540437002.

NYHUIS et al. 2006

Nyhuis, P.; Begemann, C.; Berkholz, D.; Hasenfuß, K.: Konfiguration der Fertigungssteuerung: Grundlagen und Anwendung in einer Werkstattfertigung. *wt Werkstattstechnik online* 96 (2006) 4, S. 195–199.

NYHUIS & SCHMIDT 2008

Nyhuis, P.; Schmidt, M.: Grundlagen der Produktionslogistik: Produktionsplanung und -steuerung. In: Arnold, D. et al. (Hrsg.): *Handbuch Logistik*. 3. Aufl. Berlin: Springer 2008, S. 323–342. ISBN: 9783540729297.

NYHUIS et al. 2008

Nyhuis, P.; Schmidt, M.; Schulze, C. P.: Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus - Prozessveränderungen durch Gentelligente Technologie. In: Scholz-Reiter, B. (Hrsg.): *Technologiegetriebene Veränderungen der Arbeitswelt*. Berlin: Gito-Verlag 2008, S. 293–312. ISBN: 9783940019493.

NYHUIS et al. 2009

Nyhuis, P.; Schulze, C. P.; Hartmann, W.; Schmidt, M.; Herde, F.: Bauteilgetriebene Montagesteuerung und Fabrikstrukturierung durch Nutzung Gentelligenter Technologie. *Industrie Management* 25 (2009) 2, S. 13–16.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2012 (Forschungsberichte *iwb* 265).

PAIS & SEYMONDS 2011

Pais, S.; Symonds, J.: Data Storage on a RFID Tag for a Distributed System. *International Journal of UbiComp* 2 (2011) 2, S. 26–39.

PAPE 2011

Pape, U.: *Grundlagen der Finanzierung und Investition*. München: Oldenbourg 2011. ISBN 9783486598421.

PETERMANN 1996

Petermann, D.: *Modellbasierte Produktionsregelung*. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. ISBN: 9783183193202.

PHILIPP 2014

Philipp, T. R.: RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2014 (Forschungsberichte *iwb* 282).

PILLER 2006

Piller, F. T.: *Mass Customization: Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter*. 4. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006. ISBN: 9783835003552.

POON et al. 2007

Poon, T. C.; Choy, K. L.; Lau, C.: A Real-Time Shop-Floor Control System: an Integrated RFID Approach. *International Journal of Enterprise Network Management* 1 (2007) 4, S. 331–349.

PRITSCHOW et al. 1996

Pritschow, G.; Duelen, G.; Bender, K.: Steuerung von Produktionssystemen. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): *Produktion und Management: Betriebshütte*. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 10-73–10-102. ISBN: 0387593608.

PRITSCHOW & BRINZER 2002

Pritschow, G.; Brinzer, B.: Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 97 (2002) 12, S. 627–632.

QIU 2007

Qiu, R.: RFID-enabled Automation in Support of Factory Integration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23 (2007) 6, S. 677–683.

RAN 2012

RAN – RFID-based Automotive Network <<http://www.auroran.de>> - zuletzt geprüft 08.10.2012.

REICHWALD et al. 2006

Reichwald, R.; Moser, K.; Piller, F. T.; Stotko, C. M.: Wirtschaftlichkeitsbetrachtung individualisierter Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): *Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion*. Berlin: Springer 2006, S. 165–178. ISBN: 9783540342748.

REINHART et al. 2011a

Reinhart, G.; Engelhardt P.; Genc, E.; Niehues, M.; Ostgathe, M.: Planung und Steuerung von Abläufen in der Automobilindustrie. *ZWF -Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 106 (2011) 5, S. 326–331.

REINHART et al. 2011b

Reinhart, G.; Irrenhauser, T.; Reinhardt, S.; Reisen, K.; Schellmann, H.: Wirtschaftlicher und ressourceneffizienter durch RFID? *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 106 (2011) 4, S. 225–230.

REINHART et al. 2012

Reinhart, G.; Irrenhauser, T.; Reinhardt, S.; Reisen, K.: Kriterien-basierte Nutzensauswahl in der Wirtschaftlichkeitsbewertung von RFID. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 107 (2012) 3, S. 182–186.

REINHART et al. 2013a

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Ostgathe, M.: Modular Configuration of an RFID-based Hybrid Control Architecture for a Situational Shop Floor Control. *Industrial and Systems Engineering Review* 1 (2013) 1, S. 31–39.

REINHART et al. 2013b

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Genc, E.; Irrenhauser, T.; Niehues, M.; Reinhardt, S.; Reisen, K.: RAN – RFID-based Automotive Network: Entwicklung von Methoden und Architekturen zur Steuerung und Bewertung von Abläufen in der Automobilindustrie: Schlussbericht. Förderkennzeichen BMBF01MA1002, Verbundnummer 01081825, Berichtszeitraum 01.01.2010 bis 31.12.2012. München: 2013.

REINHART et al. 2013c

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Geiger, F.; Philipp, T. R.; Wahlster, W.; Zühlke, D.; Schlick, J.; Becker, T.; Löckelt, M.; Pirvu, B.; Stephan, P.; Hodek, S.; Scholz-Reiter, B.; Thoben, K.; Gorltd, C.; Hribernik, K. A.; Lappe, D.; Veigt, M.: Cyber-Physische Produktionssysteme. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2, S. 84–89.

REINHART et al. 2013d

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Genc, E.: RFID-basierte Steuerung von Wertschöpfungsketten. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2, S. 104–108.

REINHART & ZÄH 2003

Reinhart, G.; Zäh, M.: Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003. ISBN: 9783540005940.

REINSCH 2002

Reinsch, S.: Verfahren der Logistik. In: Wiendahl, H.-P. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Logistikqualität - Vorgehen, Methoden und Werkzeuge zur Verbesserung der Logistikleistung. 2. Aufl. Berlin: Springer 2002, S. 82–91. ISBN: 9783540423621.

RHEAULT et al. 1995

Rheault, M.; Drolet, J. R., Abdounour, G.: Physically Reconfigurable Virtual Cells: A Dynamic Model for a Highly Dynamic Environment. Computers and Industrial Engineering 29 (1995) 1–4, S. 221–225.

RHENSUS & DEINDL 2009

Rhensius, T.; Deindl, M.: Metastudie RFID: Eine umfassende Analyse von Anwendungen, Nutzen und Hindernissen der RFID-Implementierung. 2. Aufl. Aachen: Forschungsinstitut für Rationalisierung (FIR) e. V. 2009. ISBN: 9783934318960.

ROHLOFF 1995

Rohloff, M.: Produktionsmanagement in modularen Organisationsstrukturen: Reorganisation der Produktion und objektorientierte Informationssysteme für verteilte Planungssegmente. München: Oldenbourg 1995. ISBN: 9783486233902.

RÖHRIG 2002

Röhrig, M.: Variantenbeherrschung mit hochflexiblen Produktionsendstufen. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Nr. 622).

SCHENK et al. 2014

Schenk, M.; Wirth, S.; Müller, E.: Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. 2. Aufl. Berlin: Springer 2014. ISBN 9783642054594.

SCHMID et al. 2014

Schmid, F.; Breit, E.; Parlings, M.: Der RAN-InfoBroker. In: Lepratti, R. et al. (Hrsg.): Transparenz in globalen Lieferketten der Automobilindustrie: Ansätze zur Logistik- und Produktionsoptimierung. 1. Aufl. Erlangen: Publicis Publishing 2014, S. 162–182. ISBN: 9783895789151.

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. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 745–780. ISBN: 9783540403067.

SCHOLZ-REITER & FREITAG 2007

Scholz-Reiter, B.; Freitag, M.: Autonomous Processes in Assembly Systems. Annals of the CIRP 56 (2007) 2, S. 712–729.

SCHRAFT et al. 1996

Schraft, R. D.; Eversheim, W.; Tönshoff, H. K.; Milberg, J.; Reinhart, G.: Planung von Produktionssystemen. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management: Betriebshütte. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 10-36–10-72. ISBN: 0387593608.

SCHUH 2006

Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540403067.

SCHUH & GIERTH 2006

Schuh, G.; Gierth, A.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Aachener PPS-Modell. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 11–27. ISBN: 9783540403067.

SCHUH & LASSEN 2006

SCHUH, G.; LASSEN, S.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Funktionen. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 195–292. ISBN: 9783540403067.

SCHUH & ROESGEN 2006

Schuh, G.; Roesgen, R.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Aufgaben. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 28–80. ISBN: 9783540403067.

SCHUH & SCHMIDT 2006

Schuh, G.; Schmidt, C.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Prozesse. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 108–194. ISBN: 9783540403067.

SCHUH & STICH 2011

Schuh, G.; Stich, V.: Produktion am Standort Deutschland. Aachen: Druckservice Zillekens 2011. ISBN: 9783943024067.

SCHUH & WESTKÄMPER 2006

Schuh, G.; Westkämper, E.: Liefertreue im Maschinen- und Anlagenbau: Stand - Potenziale - Trends. Aachen, Stuttgart: Forschungsinstitut für Rationalisierung e. V. an der RWTH Aachen, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre WZL der RWTH Aachen 2006. ISBN: 392669002X.

SCHUH et al. 2007

Schuh, G.; Gottschalk, S.; Höhne, T.: High Resolution Production Management. Annals of the CIRP 56 (2007) 1, S. 439–442.

SCHUH et al. 2011

Schuh, G.; Lödding, H.; Stich, V.; Reuter, C.; Schmidt, O.; Potente, T.; Franzkoch, B.; Brosze, T.; Thomas, C.; Wesch-Potente, C.: High Resolution Production Management. In: Brechner, C.; Klocke, F.; Schmitt, R.; Schuh, G. (Hrsg.): Wettbewerbsfaktor Produktionstechnik: Aachener Perspektiven. Aachener Werkzeugmaschinenkolloquium 2011. Aachen: Shaker 2011. S. 61–80. ISBN: 9783844000870.

SCHUH et al. 2013

Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A.: High Resolution Production Management. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2, S. 96–99.

SCHÜTTE 1998

Schütte, R.: Analyse, Konzeption und Realisierung von Informationssystemen. In: Ahlert, D. et al. (Hrsg.): Informationssysteme für das Handelsmanagement: Konzepte und Nutzung in der Unternehmenspraxis. Berlin: Springer 1998, S. 191–238. ISBN: 354063584X.

SEIBOLD 2006

Seibold, J.: Hybride Fertigungssteuerung in der Großserienproduktion. Diss. Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2006 (Berichte aus dem IFA, Band 02/2006).

SEMPROM 2013

SemProM Container Format Version 1.0 <http://www.w3.org/2005/Incubator/omm/wiki/SemProM_Container_Format_Version_1.0#Meta_Format_overview> - zuletzt geprüft 10.05.2013.

SoPRO 2013

SoPro - Selbstorganisierende Produktion <<http://www.sopro-projekt.de>> - zuletzt geprüft 01.08.2013.

SPATH et al. 2013a

Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2013. ISBN: 9783839605707.

SPATH et al. 2013b

Spath, D.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: Industrie 4.0 - Produktionsarbeit der Zukunft: wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2, S. 130–134.

SPEARMAN et al. 1989

Spearman, M. L.; Hopp, W. J.; Woodruff, D. L.: A Hierarchical Control Architecture for Constant Work in Process (Conwip) Production Systems. International Journal of Manufacturing and Operations Management 2 (1989) 3, S. 147–171.

STICKEL 2001

Stickel, E.: Informationsmanagement. München: Oldenbourg 2001. ISBN: 3486255908.

STÜRMANN 2012

Stürmann, A.: Montagesynchrone Auftragssteuerung. Diss. Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2012 (Berichte aus dem IPH, Band 01/2012).

SURI 1998

Suri, R.: Quick Response Manufacturing. A Companywide Approach to Reducing Lead Times. Portland, USA: Productivity Press 1998. ISBN: 9781563272011.

TAKEDA 2009

Takeda, H.: Das synchrone Produktionssystem. Just-in-time für das ganze Unternehmen. 6. Aufl. Landsberg am Lech: mi - verlag moderne industrie 2009. ISBN: 9783868800203.

TAMM & TRIBOWSKI 2010

Tamm, G.; Tribowski, C.: RFID. Informatik im Fokus. Berlin: Springer 2010. ISBN: 9783642114595.

THOME 2007

Thome, R.: Business-Software: ERP, SCM, APS, MES – was steckt hinter dem Begriffdschungel der Business-Software-Lösungen. Würzburg: Mainfränkisches Electronic Commerce Kompetenzzentrum (meck) 2007.

TRENTESEAUX 2009

Trenteseaux, D.: Distributed Control of Production Systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence 22 (2009), S. 971–978.

TRIBOWSKI et al. 2009

Tribowski, C., Spin, K., Günther, O.; Sielemann, O.: Storing Data on RFID tags: A Standards-based Approach. Proceeding of the 17th European Conference on Information Systems (ECIS'09). Verona, Italien: 2009.

UHLMANN et al. 2013

Uhlmann, E.; Hohwieler, E.; Kraft, M.: Selbstorganisierende Produktion mit verteilter Intelligenz. *wt Werkstattstechnik online* 103 (2013) 2, S. 114–117.

VAHRENKAMP 2004

Vahrenkamp, R.: *Produktionsmanagement*. 5. Aufl. München: Oldenbourg 2004. ISBN: 9783486275452.

VAJNA et al. 2009

Vajna, S.; Weber, C.; Bley, H.; Zeman, K.: *CAX für Ingenieure: Eine praxisbezogene Einführung*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783540360384.

VALCKENAERS & VAN BRUSSEL 2005

Valckenaers, P.; van Brussel, H.: *Holonic Manufacturing Systems*. *Annals of the CIRP* 54 (2005) 1: 427–430.

VDA-EMPFEHLUNG 5501 2011

VDA-Empfehlung 5501: *RFID im Behältermanagement der Supply Chain*. Berlin: Verband der Automobilindustrie (VDA) e. V. 2011.

VDA-EMPFEHLUNG 5510 2011

VDA-Empfehlung 5510: *RFID zur Verfolgung von Teilen und Baugruppen in der Automobilindustrie*. Berlin: Verband der Automobilindustrie (VDA) e. V. 2011.

VDI-RICHTLINIE 3633 2010

VDI-Richtlinie 3633: *Simulation von Logistik-, Materialfluß- und Produktionssystemen*, Blatt 1: Grundlagen. Berlin: Beuth 2010.

VDI-RICHTLINIE 4416 1998

VDI-Richtlinie 4416: *Betriebsdatenerfassung und Identifikation - Identifikationssysteme*. Berlin: Beuth 1998.

VDI-RICHTLINIE 5600 2007

VDI-Richtlinie 5600: *Fertigungsmanagementsysteme – Manufacturing Execution Systems (MES)*. Berlin: Beuth 2007.

VDI 1992

VDI: *Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung: Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen*. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3184010066.

VILKOV & WEIß 2008

Vilkov, L.; Weiß, B.: *Prozessorientierte Wirtschaftlichkeitsanalyse von RFID-Systemen anhand eines Referenz-Wirkungsmodells*. In: Becker, J. et al. (Hrsg.): *Wertschöpfungsnetzwerke - Konzepte für das Netzwerkmanagement und Potenziale aktueller Informationstechnologien*. Heidelberg: Physica-Verlag 2008, S. 275–303. ISBN: 9783790820560.

WAHLSTER 2013

Wahlster, W. (Hrsg.): *SemProM: Foundations of Semantic Product Memories for the Internet of Things*. Berlin: Springer 2013. ISBN: 9783642373763.

WEIDNER 1992

Weidner, D.: Engpaßorientierte Fertigungssteuerung: eine Untersuchung über die in Optimized Production Technology implementierten Konzepte der Produktionsplanung und -steuerung. Diss. Universität Kiel. Frankfurt/Main: Lang 1992. (Europäische Hochschulschriften: Reihe 5, Nr. 1304).

WERNER et al. 2007

Werner, K.; Grummt, E.; Groß, S.; Ackermann, R.: Data-on-Tag: An Approach to Privacy Friendly Usage of RFID Technologies. In: RFID SysTech 2007 - 3rd European Workshop on RFID Systems and Technologies. 12.06.2007–13.06.2007. Duisburg: 2007.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 3540260390.

WEYNS et al. 2009

Weyns, D.; Helleboogh, A.; Holvoet, T.: How to Get Multi-Agent Systems Accepted in Industry?. International Journal of Agent-Oriented Software Engineering 3 (2009) 4, S. 383–390.

WIEDENMANN 2001

Wiedenmann, H.: Modellierung von Produktionsprozessen als Beitrag zur Generierung von Termin- und Kapazitätsplanungs-Systemen bei variantenreicher Serienfertigung. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2001 (IPA-IAO Forschung und Praxis, Nr. 337).

WIEGERSHAUS 1990

Wiegiershaus, U.: Entwicklung einer Methode zur Synchronisation heterogener Fertigungsstrukturen in der Einzel- und Kleinserienproduktion. Düsseldorf: VDI-Verlag 1990. ISBN: 9783181409022.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-H.: Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: 2002 (IPA-IAO Forschung und Praxis, Nr. 358).

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: Springer 2008, S. 275–304. ISBN: 3540756418.

WIENDAHL 1991

Wiendahl, H.-P.: Anwendung der Belastungsorientierten Auftragsfreigabe. München: Carl Hanser 1991.

WIENDAHL et al. 1993

Wiendahl, H.-P., Pritschow, G.; Milberg, J.: Produktionsregelung - interdisziplinäre Zusammenarbeit führt zu neuen Ansätzen, Teil 1. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 88 (1993) 6, S. 265–268.

WIENDAHL 1996a

Wiendahl, H.-P.: Modelle und Systeme des Produktionscontrolling. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management: Betriebsstätte. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 18-32–18-63. ISBN: 0387593608.

WIENDAHL 1996b

Wiendahl, H.-P.: Grundlagen der Fabrikplanung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management: Betriebsstätte. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 9-1–9-31. ISBN: 0387593608.

WIENDAHL 1997

Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung: Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. 2. Aufl. München: Carl Hanser 1997. ISBN: 3446190848.

WIENDAHL et al. 2006

Wiendahl, H.-P.; Nyhuis, P.; Fischer, A.; Grabe, D.: Controlling in Lieferketten. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 467–510. ISBN: 9783540403067.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München: Carl Hanser 2010. ISBN: 9783446418783.

WINDT 2001

Windt, K.: Engpaßorientierte Fremdvergabe in Produktionsnetzen. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001. ISBN: 9783183579020.

WINDT 2008

Windt, K.: Ermittlung des angemessenen Selbststeuerungsgrades in der Logistik - Grenzen der Selbststeuerung. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer 2008, S. 349–372. ISBN: 3540756418.

WINDT et al. 2008

Windt, K.; Philipp, T.; Böse, F.: Complexity Cube for the Characterization of Complex Production Systems. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 21 (2008) 2, S. 195–200.

WINZ & QUINT 1997

Winz, G.; Quint, M.: Prozesskettenmanagement - Leitfaden für die Praxis. Dortmund: Verlag Praxiswissen GmbH 1997. ISBN: 9783929443837.

WILDEMANN 1998

Wildemann, H.: Die modulare Fabrik - Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. 5. Aufl. München: TCW-Verlag 1998. ISBN: 9783931511197.

WILDEMANN 2009

Wildemann, H.: Variantenmanagement: Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung in Produkt und Prozess. 17. Aufl. München: TCW-Verlag 2009. ISBN: 9783929918175.

WITTMANN 1959

Wittmann, W.: Unternehmung und unvollkommene Information. Köln: Westdeutscher Verlag 1959.

WOLL 2008

Woll, A.: Wirtschaftslexikon. 10. Aufl. München: Oldenbourg 2008. ISBN 9783486254921.

YU 2001

Yu, K.-W.: Terminkennlinie: Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Nr. 576).

ZAEH & OSTGATHE 2009

Zaeh, M. F.; Ostgathe, M.: A Multi-agent-supported, Product-based Production Control. Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA 2009). Christchurch, Neuseeland: 2009.

ZAEH et al. 2012

Zaeh, M. F.; Ostgathe, M.; Geiger, F.; Reinhart, G.: Adaptive Job Control in the Cognitive Factory. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Enabling Manufacturing Competitiveness and Economic Sustainability. Berlin: Springer 2012, S. 10–17. ISBN: 9783642238598.

ZÄPFEL 1998

Zäpfel, G.: Grundlagen und Möglichkeiten der Gestaltung dezentraler PPS-Systeme. In: Corsten, H. et al. (Hrsg.): Dezentrale Produktionsplanungs- und -steuerungs-Systeme. Stuttgart: Kohlhammer 1998, S. 11-53. ISBN: 3170153021.

ZBIB et al. 2008

Zbib, N.; Raileanu, S.; Sallez, Y.; Berger, T.; Trentesaux, D.: From Passive Products to Intelligent Products: The Augmentation Module Concept. In: Bernard, A. (Hrsg.): 5th International Conference on Digital Enterprise Technology (DET 2008). 22.–24.10.2008. Nantes, Frankreich: Publibook 2008, S. 243–259.

ZHOU et al. 2007

Zhou, S.; Ling, W.; Peng, Z.: An RFID-based Remote Monitoring System for Enterprise Internal Production Management. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 33 (2007) 7–8, S. 837–844.

12 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der Variantenvielfalt und der Stückzahlen (WILDEMANN 2009).....	1
Abbildung 2:	Zielsetzung und Schwerpunkte der vorliegenden Arbeit.....	6
Abbildung 3:	Aufbau der vorliegenden Arbeit	8
Abbildung 4:	Zielsystem der PPS (WIENDAHL 2010)	13
Abbildung 5:	Arbeitsvorgangsbezogene Elemente der Durchlaufzeit (WIENDAHL 2010).....	15
Abbildung 6:	Aufgaben der PPS (Aachener PPS-Modell) (SCHUH & GIERTH 2006)	17
Abbildung 7:	Modell der Fertigungssteuerung (LÖDDING 2008, OSTGATHE 2012)	18
Abbildung 8:	Einordnung der Aufgaben eines MES in die Leitebenen eines Unternehmens (FUCHS 2013)	23
Abbildung 9:	Aufbau eines RFID-Systems (FINKENZELLER 2008).....	25
Abbildung 10:	Klassen eines intelligenten Produktes (ZBIB 2008, OSTGATHE 2012, REINHART et al. 2013c).....	41
Abbildung 11:	Nutzenkategorien intelligenter Produkte (OSTGATHE 2012)	42
Abbildung 12:	Grundformen von Organisationsstrukturen (BONGAERTS et al. 2000, TRENTESAUX 2009, OSTGATHE 2012).....	49
Abbildung 13:	Attribute eines Auftrags in UML (PHILIPP 2014)	53
Abbildung 14:	Vergleich der accessMethods noDirectory und directory (ISO/IEC 15962 2004b)	56
Abbildung 15:	SemProM-Datenformat (HORN et al. 2013)	57
Abbildung 16:	System zur RFID-gestützten situationsbasierten Produktionssteuerung.....	62
Abbildung 17:	Einordnung des Produktionsmoduls in die hierarchische Betriebsstruktur (STÜRSMANN 2012).....	65
Abbildung 18:	Steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung in der Werkstatt- und Fließfertigung (Beispiel)	66
Abbildung 19:	Prinzipien für die steuerungsorientierte Produktionsmodularisierung	68
Abbildung 20:	Algorithmus der produktbezogenen Clusteranalyse zur steuerungsorientierten Produktionsmodularisierung	71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 21:	Beispielhaftes Dendrogramm und Modularisierungsvorschlag.....	75
Abbildung 22:	Schematische Darstellung der Durchlaufzeiten bei der konventionellen, nicht synchronisierenden Auftragsfreigabe	79
Abbildung 23:	Beispielhafter Montagevorranggraph und Produktkategorisierung.....	79
Abbildung 24:	Beispielhafter Arbeitsplan (EVERSHEIM et al. 1996)	80
Abbildung 25:	Beispielhafte Vorwärts- und Rückwärtsrechnung zur Bestimmung des Synchronisationspunktes und der logischen Modulgrenze.....	82
Abbildung 26:	RFID-basiertes hybrides Informationsmanagement	85
Abbildung 27:	Interaktion und Schnittstellen der Steuerungselemente	87
Abbildung 28:	Aufgabenbereiche des SAS	88
Abbildung 29:	Subsysteme und Aufgabenbereiche des EVS.....	91
Abbildung 30:	Aufgabenbereiche des SAS-Mitarbeiterdialogs	94
Abbildung 31:	Aufgabenbereiche des intelligenten Produktes	97
Abbildung 32:	Daten und Datenstruktur zur Abbildung des Auftragsstatus.....	100
Abbildung 33:	Daten und Datenstruktur zur Abbildung des Produktzustands	102
Abbildung 34:	Übersicht der situationsbasierten Steuerungsverfahren ..	103
Abbildung 35:	Situationsbasierte ConWIP-Auftragsfreigabe	107
Abbildung 36:	Situationsbasierte Engpass-Auftragsfreigabe.....	108
Abbildung 37:	Situationsbasierte BOA und Workload Control.....	110
Abbildung 38:	Steuerungsablauf und -daten der zweiten Freigabestufe.....	112
Abbildung 39:	Situationsbasierte Schlupfzeitregelung	115
Abbildung 40:	Situationsbasierte rüstzeitoptimierende Reihenfolgebildung.....	117
Abbildung 41:	Konventionelle Schlupfzeitregelung ohne Schlupfzeitverteilung	118
Abbildung 42:	Schematischer Ablauf der intermodularen Schlupfzeitverteilung	121
Abbildung 43:	Funktionsverlauf des termintreuebezogenen Abgabefaktors	124
Abbildung 44:	Funktionsverlauf des termintreuebezogenen Hilfsfaktors.....	125

Abbildung 45:	Situationsbasierte Rückstandsmessung	130
Abbildung 46:	Anbringung des RFID-Transponders am Fahrzeugsitz (Fotos: REINHART et al. 2013d)	137
Abbildung 47:	Einstufiges Zahnradgetriebes (Foto: G. Sigl, iwb).....	140
Abbildung 48:	Schematische Darstellung des Steuerungsszenarios (Grafik: B. Klimm, SALT Solutions GmbH).....	141
Abbildung 49:	Intuitive Informationsbereitstellung über den in SAP ME umgesetzten SAS-Mitarbeiterdialog	142
Abbildung 50:	Vereinfachter Gozintograph des Nutzfahrzeugsitzes	144
Abbildung 51:	Produktionsstruktur der Fahrzeugsitzmontage (REINHART et al. 2011a).....	145
Abbildung 52:	Produktionsmodularisierung und situationsbasierte Steuerungsflüsse am Beispiel der Fahrzeugsitzmontage	148
Abbildung 53:	Durchlaufzeiten der drei Auftragsfreigabeverfahren im Vergleich.....	151
Abbildung 54:	Durchlaufzeitverläufe in der Sitzstrukturmontage mit und ohne intramodularer Rückstandsregelung	153
Abbildung 55:	Gozintograph der Getriebestruktur	154
Abbildung 56:	Produktions- und Modulstruktur der Getriebeproduktion	154

13 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Beispielhafte Produkt-Arbeitssystem-Matrix.....	69
Tabelle 2:	Beispielhafte, initiale Binärmatrix.....	71
Tabelle 3:	Schematische und beispielhafte Kontingenzmatrix	72
Tabelle 4:	Beispielhafte Distanzmatrix.....	73
Tabelle 5:	Beispielhafte adaptierte Distanzmatrix.....	74
Tabelle 6:	Beispielhafte Rüstmatrix (VAHRENKAMP 2004).....	116
Tabelle 7:	Beispielhafte Modulvergleichsmatrix.....	127
Tabelle 8:	Modulqualifikationsmatrix (LÖDDING 2008).....	132
Tabelle 9:	Ergebnisse der drei zu vergleichenden Simulationsmodelle.....	151
Tabelle 10:	Produkt-Arbeitssystem-Matrix der Getriebeproduktion	155
Tabelle 11:	Modulvergleichsmatrix der Getriebeproduktion	158
Tabelle 12:	Ergebnisse der zu vergleichenden Simulationsmodelle ..	160
Tabelle 13:	Simulationsergebnisse als logistische Datengrundlage für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	165
Tabelle 14:	Investitionskosten zur Umsetzung der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe am Praxisbeispiel (geschätzt)	166
Tabelle 15:	Investitionskosten zur Umsetzung der konventionellen ConWIP-Steuerung am Praxisbeispiel (geschätzt)	167
Tabelle 16:	Betriebskosten der synchronen zweistufigen Auftragsfreigabe am Praxisbeispiel (geschätzt)	168
Tabelle 17:	Betriebskosten der konventionellen ConWIP- Steuerung am Praxisbeispiel (geschätzt)	168
Tabelle 18:	Spezifikation der Montageabschnitte (geschätzt)	169
Tabelle 19:	Berechnung des Maschinenstundensatzes	169

14 Anhang

14.1 Studienarbeiten

Im Rahmen der Entstehung der vorliegenden Dissertationsschrift wurden unter wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München sowie an der Projektgruppe für Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) Studienarbeiten betreut. Diese haben sich mit Fragestellungen der Produktionsplanung und -steuerung im Allgemeinen und der RFID-gestützten situationsbasierten Steuerung von Produktionsabläufen im Speziellen befasst. Inhalte und Erkenntnisse aus diesen Arbeiten sind teilweise in die vorliegende Dissertation eingegangen. Der Autor dankt den Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Im Folgenden sind die Studienarbeiten in alphabetischer Reihenfolge des Nachnamens der Autoren aufgeführt.

EINSANK, W.

Simulationsbasierte Evaluierung einer RFID-basierten, situativen Produktionssteuerung, eingereicht im März 2013. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 9.3.2 eingegangen.

JATZLAU, P.

Entwicklung eines Konzepts zur Bewertung hybrider Ansätze zur Produktionssteuerung, eingereicht im Oktober 2012. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 4.2 eingegangen.

LUTZ, M.

Entwicklung eines Konzeptes zur Layoutgestaltung einer RFID-unterstützten Getriebemontage, eingereicht im April 2012. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 6.4.2 eingegangen.

MALESCHA, F.

Entwicklung eines Ansatzes zur Beschreibung von Prozessen, Daten und Zustandsänderungen für eine RFID-basierte hybride Steuerung von Produktionsabläufen, eingereicht im Februar 2012. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 7.2.4 eingegangen.

PETERSEN, T.

Entwicklung einer Methode zur Konfiguration einer situativen Produktionssteuerung, eingereicht im Dezember 2012. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 8.2.2, 8.3.2 und 8.4.2 eingegangen.

SCHELO, T.

Bewertung einer RFID-basierten hybriden Steuerungsarchitektur in Abhängigkeit von Organisationsform und Steuerungsverfahren, eingereicht im November 2011. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 8.2.2 eingegangen.

THIEDE, T.

Simulative Potenzialbewertung einer RFID-basierten hybriden Steuerung von Produktionsabläufen, eingereicht im Februar 2012. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 9.3 eingegangen.

WEIDNER, M.

Entwicklung situationsbasierter Steuerungsverfahren für eine RFID-gestützte Produktionssteuerung, eingereicht im Juni 2014. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 8.2, 8.3 und 8.4 eingegangen.

WEIDNER, M.

Entwicklung und simulationsgestützte Validierung der situationsbasierten Auftragssequenzierung mit intermodularer Schlupfzeitverteilung, eingereicht im Dezember 2014. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 8.3 und 9.3.3 eingegangen.

WEIDNER, S.

Informationstechnische Integration einer RFID-gestützten, kamerabasierten Qualitätssicherung in SAP Manufacturing Execution, eingereicht im August 2014. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 9.2.2 eingegangen.

14.2 Genutzte Softwareprodukte

HALCON

MVTEC Software GmbH, Neherstraße 1, 81675 München

Microsoft Office

Microsoft Deutschland GmbH, Konrad-Zuse-Straße 1, 85716 Unterschleißheim

Microsoft Visual Studio

Microsoft Deutschland GmbH, Konrad-Zuse-Straße 1, 85716 Unterschleißheim

Plant Simulation

Siemens Industry Software GmbH & Co. KG, Franz-Geuer-Straße 10, 50823 Köln

SALT Add-ons für SAP

SALT Solutions GmbH, Landsberger Straße 314, 80687 München

SAP ERP

SAP AG, Dietmar-Hopp-Allee 16, 69190 Walldorf

SAP Manufacturing Execution

SAP AG, Dietmar-Hopp-Allee 16, 69190 Walldorf

SAP Manufacturing Integration and Intelligence

SAP AG, Dietmar-Hopp-Allee 16, 69190 Walldorf

SAP Plant Connectivity

SAP AG, Dietmar-Hopp-Allee 16, 69190 Walldorf

SIMATIC NET

Siemens AG, Wittelsbacherplatz 2, 80333 München

SIMATIC RF-Manager

Siemens AG, Wittelsbacherplatz 2, 80333 München

Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten - ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten - ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlussseminar**
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlink im Mittelstand
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwv Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte IWB Band 1–121

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen.

- 1 Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 Fuchsberger, A.: Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 Maier, C.: Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrieroboter
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 Summer, H.: Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 Simon, W.: Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 Büchs, S.: Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 Hunzinger, J.: Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 Pilland, U.: Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 Reithofer, N.: Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 Reinhart, G.: Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungszäse
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 Bürstner, H.: Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 Riese, K.: Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 Lutz, P.: Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 Klippel, C.: Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 Rascher, R.: Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 Heusler, H.-J.: Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 Kirchknopf, P.: Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 Sauerer, Ch.: Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 Karstedt, K.: Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 Peiker, St.: Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 Schugmann, R.: Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 Wrba, P.: Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 Eibelhäuser, P.: Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 Prasch, J.: Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 Teich, K.: **Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**
1990 - 52 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfang, W.: **Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**
1990 - 59 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.: **Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**
1990 - 93 Abb. - 190 Seiten - ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.: **Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**
1991 - 75 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.: **Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**
1991 - 58 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuzcek, H.: **Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**
1992 - 125 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.: **Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten**
1991 - 60 Abb. - 166 Seiten - ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.: **3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**
1991 - 66 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.: **Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**
1991 - 85 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.: **Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**
1991 - 68 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.: **Dynamisches Verhalten von Kreissägen**
1991 - 109 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.: **Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**
1991 - 86 Abb. - 201 Seiten - ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.: **3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**
1991 - 74 Abb. - 126 Seiten - ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.: **Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**
1992 - 108 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.: **Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**
1992 - 94 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hoßmann, J.: **Methodik zur Planung der automatisierten Montage von nicht formstabilen Bauteilen**
1992 - 73 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-5520-0
- 44 Petry, M.: **Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkaskens für robotergeführte Klebprozesse**
1992 - 106 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.: **Integrierte Diagnose in Produktionszellen**
1992 - 87 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.: **Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**
1992 - 70 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.: **Prozßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**
1992 - 84 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schrüfer, N.: **Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**
1992 - 103 Abb. - 161 Seiten - ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.: **Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**
1992 - 77 Abb. - 176 Seiten - ISBN 3-540-55512-9
- 50 Garnich, F.: **Laserbearbeitung mit Robotern**
1992 - 110 Abb. - 184 Seiten - ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.: **Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**
1992 - 89 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-44441-2
- 52 Glaas, W.: **Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**
1992 - 67 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.: **Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**
1992 - 60 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.: **Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**
1992 - 75 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.: **Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**
1992 - 67 Abb. - 135 Seiten - ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bomm, H.: **Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**
1992 - 87 Abb. - 195 Seiten - ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.: **Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**
1992 - 74 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.: **Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**
1993 - 67 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.: **Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**
1993 - 72 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56307-5
- 60 Strohmayr, R.: **Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeeinrichtungen**
1993 - 80 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-56652-X
- 61 Glas, J.: **Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware**
1993 - 80 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-56890-5
- 62 Stetter, R.: **Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 - 91 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56889-1
- 63 Dirndorfer, A.: **Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57031-4
- 64 Wiedemann, M.: **Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen**
1993 - 81 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-57177-9
- 65 Woenckhaus, Ch.: **Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung**
1994 - 81 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-57284-8
- 66 Kummesteiner, G.: **3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme**
1994 - 62 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-57535-9
- 67 Kugelmann, F.: **Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57549-9
- 68 Schwarz, H.: **Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 - 96 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-57577-4
- 69 Wiethen, U.: **Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**
1994 - 70 Abb. - 142 Seiten - ISBN 3-540-57794-7
- 70 Seehuber, M.: **Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 - 72 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-57896-X
- 71 Amann, W.: **Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen**
1994 - 71 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-57924-9
- 72 Schöpf, M.: **Rechnergestütztes Projektförderungs- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 - 63 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58052-2
- 73 Welling, A.: **Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 - 66 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-580-0
- 74 Zetmayer, H.: **Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinstserienproduktion**
1994 - 62 Abb. - 143 Seiten - ISBN 3-540-58134-0

- 75 Lindl, M.: Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 - 66 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58221-5
- 76 Zipper, B.: Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 - 64 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58222-3
- 77 Raith, P.: Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 - 51 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58223-1
- 78 Engel, A.: Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 - 69 Abb. - 160 Seiten - ISBN 3-540-58258-4
- 79 Zäh, M. F.: Dynamisches Prozessmodell Kreissägen
1995 - 95 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-58624-5
- 80 Zwanzler, N.: Technologisches Prozessmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 - 65 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-58634-2
- 81 Romanow, P.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 - 66 Abb. - 151 Seiten - ISBN 3-540-58771-3
- 82 Kahlenberg, R.: Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 - 71 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-58772-1
- 83 Huber, A.: Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 - 87 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-58773-X
- 84 Birkel, G.: Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 - 64 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-58869-8
- 85 Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 - 77 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-58942-2
- 86 Nedeljkovic-Groha, V.: Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 - 94 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-58953-8
- 87 Rockland, M.: Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 - 83 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-58999-6
- 88 Linner, St.: Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 - 67 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-59016-1
- 89 Eder, Th.: Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 - 62 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-59084-6
- 90 Deutschle, U.: Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 - 80 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-59337-3
- 91 Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 - 68 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-60120-1
- 92 Hechl, Chr.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 - 73 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-60325-5
- 93 Albertz, F.: Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 - 83 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-60608-8
- 94 Trunzer, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgenseoren
1996 - 101 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-60961-X
- 95 Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 - 83 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-60960-1
- 96 Trucks, V.: Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 - 64 Abb. - 141 Seiten - ISBN 3-540-60599-8
- 97 Schäffer, G.: Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 - 71 Abb. - 170 Seiten - ISBN 3-540-60958-X
- 98 Koch, M. R.: Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 - 67 Abb. - 138 Seiten - ISBN 3-540-61104-5
- 99 Moctezuma de la Barrera, J. L.: Ein durchgängiges System zur Computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 - 99 Abb. - 175 Seiten - ISBN 3-540-61145-2
- 100 Geuer, A.: Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 - 84 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-61495-8
- 101 Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 - 67 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-61678-0
- 102 Pischelstrieder, K.: Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 - 74 Abb. - 171 Seiten - ISBN 3-540-61714-0
- 103 Köhler, R.: Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 - 62 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-62024-9
- 104 Feldmann, Ch.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 - 71 Abb. - 163 Seiten - ISBN 3-540-62059-1
- 105 Lehmann, H.: Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystemen
1997 - 96 Abb. - 191 Seiten - ISBN 3-540-62202-0
- 106 Wagner, M.: Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 - 94 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-62656-5
- 107 Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 - 63 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-62794-4
- 108 Krönert, U.: Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 - 53 Abb. - 127 Seiten - ISBN 3-540-63338-3
- 109 Pfersdorf, I.: Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 - 74 Abb. - 172 Seiten - ISBN 3-540-63615-3
- 110 Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 - 77 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-63642-0
- 111 Kaiser, J.: Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 - 67 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-63999-3
- 112 Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 - 85 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-64195-5
- 113 Martin, C.: Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 - 73 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-64401-6
- 114 Löffler, Th.: Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 - 85 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-64511-X
- 115 Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 - 84 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-64686-8
- 116 Koehrer, J.: Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 - 75 Abb. - 185 Seiten - ISBN 3-540-65037-7
- 117 Schuller, R. W.: Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 - 76 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-65320-1
- 118 Debuschewitz, M.: Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 - 104 Abb. - 169 Seiten - ISBN 3-540-65350-3

- 119 Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline- Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 - 98 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-65382-1
- 120 Pfoh, E.: Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 - 69 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-65525-5
- 121 Spitznagel, J.: Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 - 63 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-65896-3

Forschungsberichte IWB ab Band 122

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernold Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten - ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten - ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten - ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Rolf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten - ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten - ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
152 Seiten - ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Hetmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten - ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialfußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten - ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten - ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten - ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokusspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten - ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten - ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schilffebacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten - ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprengel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten - ISBN 978-3-89675-757-9
- 142 *Andreas Gallasch*: Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 *Ralf Cuiper*: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 *Christian Schneider*: Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 *Christian Jonas*: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 *Ulrich Willnecker*: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 *Christof Lehner*: Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 *Frank Rick*: Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 *Michael Höhn*: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0

- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudarfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Führer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weissenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Raßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitinge:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieveling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kaustems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Joachim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierloh:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9
- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3

- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgasfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schlip:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griebisch:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraber:** Sensoreinsatz in der telepräsen- ten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlicknieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Müller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Würsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsen- te Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigl:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlstahns
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasieren förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in unterbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4

- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflusintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Rad:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreißschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmelitungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5
- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwingrad-Reißschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Moutchiho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6

- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathy Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4369-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahmert:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreißschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 **Florian Karl:** Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 **Philipp Ronald Engelhardt:** System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4472-8

