

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik  
am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*)

**System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen  
in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage**

**Martin Ostgathe**

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. Manfred Hajek

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Katja Windt  
Jacobs University Bremen

Die Dissertation wurde am 16.04.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 20.07.2012 angenommen.



Martin Ostgathe

**System zur produktbasierten Steuerung  
von Abläufen in der auftragsbezogenen  
Fertigung und Montage**



Herbert Utz Verlag · München

## **Forschungsberichte IWB**

Band 265

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2012

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 · 2012

ISBN 978-3-8316-4206-9

Printed in Germany  
Herbert Utz Verlag GmbH, München  
089-277791-00 · [www.utzverlag.de](http://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 Potenziale 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.



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und die großzügige Unterstützung meiner Arbeit gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts. Bei Frau Prof. Dr.-Ing. Katja Windt, der Leiterin des Lehrstuhls für Global Production Logistics an der Jacobs University Bremen, bedanke ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit sehr herzlich. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Manfred Hajek, dem Leiter des Lehrstuhls für Hubschraubertechnologie an der Technischen Universität München.

Darüber hinaus bedanke ich mich sehr herzlich bei allen Kolleginnen und Kollegen des Institutes sowie bei allen Studentinnen und Studenten, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Herrn Dipl.-Wi.-Ing. Mathey Wiesbeck danke ich für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Anregungen zu dieser Arbeit. Für die kritische Durchsicht meiner Arbeit danke ich insbesondere Herrn Dr.-Ing. Florian Schwarz und Herrn Dipl.-Ing. Florian Geiger.

Schließlich möchte ich mich besonders bei meiner Familie bedanken, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mich in all den Jahren liebevoll unterstützt hat.

München, im Juli 2012

*Martin Ostgathe*



---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis.....</b>	<b>I</b>
<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>VII</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>XIII</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>XV</b>
<b>Verzeichnis der Formelzeichen.....</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problemstellung .....	3
1.3 Zielsetzung.....	8
1.4 Aufbau der Arbeit .....	11
<b>2 Grundlagen.....</b>	<b>13</b>
2.1 Übersicht.....	13
2.2 Individualisierungskonzepte .....	13
2.3 Flexibilität .....	16
2.4 Planung und Steuerung von Produktionsabläufen.....	19
2.4.1 Allgemeines .....	19
2.4.2 Logistische Zielgrößen der Produktionsplanung und -steuerung .....	20
2.4.2.1 Übersicht.....	20
2.4.2.2 Bestand.....	22
2.4.2.3 Durchlaufzeit .....	22
2.4.2.4 Termintreue.....	24
2.4.2.5 Auslastung .....	24

2.4.3	Grundlagen der Produktionsplanung .....	25
2.4.4	Grundlagen der Produktionssteuerung .....	27
2.5	Informationslogistik in der Produktion .....	29
2.5.1	Begriffsdefinitionen.....	29
2.5.2	Bedeutung für die Produktionsplanung und -steuerung .....	31
2.6	Fazit .....	33
<b>3</b>	<b>Anforderungen an das System zur produktbasierten Steuerung.....</b>	<b>35</b>
<b>4</b>	<b>Stand der Forschung und Technik .....</b>	<b>41</b>
4.1	Übersicht.....	41
4.2	Adaptive Steuerung von Produktionsabläufen .....	41
4.2.1	Organisationsstrukturen von Steuerungssystemen .....	41
4.2.2	Bedeutung von Informations- und Kommunikationstechnologien .....	49
4.2.2.1	Automatische Identifikationstechnologien.....	49
4.2.2.2	Grundlagen der RFID-Technologie.....	51
4.2.3	Ansätze zur sensorgestützten Produktionssteuerung.....	54
4.2.4	Zwischenfazit.....	59
4.3	Verfahren zum autonomen Störungsmanagement.....	60
4.3.1	Störungsmanagement.....	60
4.3.2	Wissensbasierte Systeme .....	63
4.3.2.1	Allgemeines .....	63
4.3.2.2	Aufbau von wissensbasierten Systemen.....	63
4.3.2.3	Wissensrepräsentation .....	65
4.3.2.4	Wissensverarbeitung (Inferenz).....	66

---

4.3.3	Einsatz von wissensbasierten Systemen zum autonomen Störungsmanagement.....	68
4.3.4	Zwischenfazit.....	71
4.4	Modellierung von Produktionsabläufen .....	71
4.4.1	Allgemeines .....	71
4.4.2	Darstellung von produktbezogenen Informationen .....	72
4.4.3	Durchgängige Datenmodelle für die Fertigungsplanung und den Produktionsbetrieb .....	74
4.4.4	Zwischenfazit.....	79
4.5	Handlungsbedarf.....	80
<b>5</b>	<b>Datenmodell für adaptive Produktionssysteme.....</b>	<b>83</b>
5.1	Übersicht.....	83
5.2	Modellierung von produktindividuellen Prozessketten.....	84
5.2.1	Allgemeines .....	84
5.2.2	Beschreibung von Bearbeitungsaufgaben.....	85
5.2.3	Abbildung von Produkten und Zuständen von Werkstücken....	87
5.2.4	Abbildung von Prozessen .....	89
5.2.5	Modularisierung von Produktionsabläufen.....	93
5.2.6	Ausprägungen und Strukturierung von Prozessbausteinen .....	95
5.2.6.1	Übersicht.....	95
5.2.6.2	Organisationsbezogener Baustein.....	96
5.2.6.3	Verfahrens- und ablaufspezifischer Baustein .....	97
5.2.6.4	Dokumentationsbezogener Baustein .....	98
5.2.6.5	Darstellung von Prozessbausteinen .....	99

5.2.7	Vernetzung von Prozessbausteinen .....	100
5.2.7.1	Allgemeines .....	100
5.2.7.2	Grundlagen von Petri-Netzen .....	101
5.2.7.3	Definition generischer Prozessstrukturen.....	103
5.2.7.4	Integration von Prozessbausteinen .....	106
5.2.7.5	Darstellung der produktindividuellen Prozesskette....	109
5.3	Ressourcenmodul.....	113
5.3.1	Allgemeines .....	113
5.3.2	Abbildung von Ressourcenfähigkeiten.....	113
5.3.3	Aufbau der Systemarchitektur .....	120
5.4	Fazit .....	122
<b>6</b>	<b>Wissensbasiertes System zum autonomen Störungsmanagement.....</b>	<b>125</b>
6.1	Übersicht.....	125
6.2	Definition von Produktqualitätsmerkmalen .....	125
6.3	Modellierung der Wissensbasis .....	127
6.4	Ablauf des wissensbasierten Störungsmanagements .....	130
6.5	Fazit .....	134
<b>7</b>	<b>Organisationsstruktur für das System zur produktbasierten Steuerung</b> <b>.....</b>	<b>135</b>
7.1	Übersicht.....	135
7.2	Idee und Lösungsansatz.....	136
7.3	Datenhaltungsmanagement.....	138
7.4	Entwicklung der Organisationsstruktur .....	141
7.4.1	Allgemeines .....	141

---

7.4.2	Aufgaben der globalen Organisationseinheit.....	144
7.4.3	Aufgaben der lokalen Organisationseinheiten.....	153
7.4.4	Management von produkt- und ressourcenbezogenen Störungen .....	156
7.5	Fazit.....	162
<b>8</b>	<b>Umsetzung und Validierung .....</b>	<b>165</b>
8.1	Übersicht.....	165
8.2	Hardwaretechnische Umsetzung.....	165
8.2.1	Beschreibung der Modellfabrik und der verwendeten Hardware .....	165
8.2.2	Architektur und Anwendung des Softwaresystems.....	168
8.2.2.1	Allgemeines .....	168
8.2.2.2	Konfigurationsphase .....	169
8.2.2.3	Ausführungsphase.....	171
8.2.2.4	Wissensbasiertes System zum autonomen Störungsmanagement.....	178
8.3	Simulationstechnische Validierung.....	184
8.3.1	Allgemeines .....	184
8.3.2	Simulationsmodelle und Versuchsplanung.....	185
8.3.3	Analyse und Diskussion der Simulationsergebnisse .....	187
8.4	Bewertung.....	191
8.4.1	Allgemeine Bewertung .....	191
8.4.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung .....	193
8.4.3	Resümee.....	194
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>195</b>

<b>10 Literaturverzeichnis</b> .....	<b>199</b>
<b>11 Anhang</b> .....	<b>229</b>
11.1 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten.....	229
11.2 Genutzte Softwareprodukte .....	230

---

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Entwicklung der Variantenvielfalt und der Stückzahlen in stagnierenden Märkten (in Anlehnung an WILDEMANN 2009b) .	2
Abbildung 2:	Veränderte Produktionsstrategien im turbulenten Umfeld (in Anlehnung an WIENDAHL 2002) .....	4
Abbildung 3:	Prozentuale Abweichungen der Produktivität vom Durchschnitt des verarbeitenden Gewerbes (in Anlehnung an LAY et al. 2009) .....	6
Abbildung 4:	Zielsetzung und Schwerpunkte der Arbeit.....	9
Abbildung 5:	Aufbau der Arbeit .....	12
Abbildung 6:	Darstellung verschiedener Individualisierungskonzepte mit den jeweiligen Zeitpunkten der Kundenintegration (in Anlehnung an EIDENMÜLLER 1995, PILLER & STOTKO 2003).....	15
Abbildung 7:	Flexibilitätsbereiche Produkt, Ressource und Prozess mit den zugehörigen Flexibilitätsmerkmalen.....	17
Abbildung 8:	Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) (in Anlehnung an WIENDAHL 2010).....	21
Abbildung 9:	Auftrags- und arbeitsvorgangsbezogene Elemente der Durchlaufzeit (in Anlehnung an WIENDAHL 2010).....	23
Abbildung 10:	Termintreue und Termineinhaltung (in Anlehnung an YU 2001) .....	24
Abbildung 11:	Hauptaufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (Aachener PPS-Modell) (SCHUH & GIERTH 2006b) .....	26
Abbildung 12:	Modell der Fertigungssteuerung (in Anlehnung an LÖDDING 2008b) .....	28
Abbildung 13:	Zusammenhang zwischen Daten, Informationen und Wissen (in Anlehnung an REHÄUSER & KRUMHOLTZ 1996) .....	31
Abbildung 14:	Erweitertes Produktionsfaktorenschema unter Berücksichtigung von Informationen (in Anlehnung an PILLER 2006).....	32

Abbildung 15: Charakteristischen Eigenschaften ausgewählter Produktionstypen (in Anlehnung an PICOT et al. 2003).....	34
Abbildung 16: Anforderungen an das System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage .....	36
Abbildung 17: Horizontale und vertikale Kommunikationsbeziehungen zwischen Organisationseinheiten (in Anlehnung an DOBBERSTEIN 1997).....	43
Abbildung 18: Grundformen von Organisationsstrukturen (in Anlehnung an BONGAERTS et al. 2000, TRENTESAUX 2009) .....	44
Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Autonomie- und Abstimmungskosten (in Anlehnung an FRESE 2005).....	47
Abbildung 20: Bewertung verschiedener Organisationsstrukturen.....	48
Abbildung 21: Aufbau und Funktionsweise eines RFID-Systems (in Anlehnung an JÜNEMANN & BEYER 1998, FINKENZELLER 2008) .....	52
Abbildung 22: Die vier Klassen eines intelligenten Produktes .....	54
Abbildung 23: Nutzenpotenziale der Einführung von intelligenten Produkten in Produktionsumgebungen .....	55
Abbildung 24: Drei Phasen der Fehler- bzw. Störungsbeseitigung.....	62
Abbildung 25: Allgemeine Architektur eines Expertensystems (in Anlehnung an PUPPE 1988, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008) .....	64
Abbildung 26: Beispielhafter Ablauf einer datengetriebenen Inferenz (in Anlehnung an SPRECKELSEN & SPITZER 2009) .....	67
Abbildung 27: Beispielhafter Ablauf einer zielorientierten Inferenz (in Anlehnung an SPRECKELSEN & SPITZER 2009) .....	68
Abbildung 28: Technische Informationen als Untermenge der Produktinformationen (in Anlehnung an DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1990) .....	73
Abbildung 29: Teilelemente des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen .....	81

---

Abbildung 30: Bestandteile zur vollständigen Beschreibung einer Bearbeitungsaufgabe (in Anlehnung an EVERSHEIM 1989) .....	86
Abbildung 31: Referenzinformationsstruktur für die Beschreibung von Produkten .....	88
Abbildung 32: Beschreibung von Hauptformelementen (in Anlehnung an KNOCHE 2005) .....	89
Abbildung 33: Strukturierte Einteilung von Verfahrensarten am Beispiel „Trennen“ .....	91
Abbildung 34: Referenzinformationsstruktur für die Darstellung von Prozessen .....	92
Abbildung 35: Charakteristische Eigenschaften einer modularen, bausteinbasierten Beschreibung von Produktionsabläufen (in Anlehnung an GRUNWALD 2002) .....	95
Abbildung 36: Zusammensetzung des organisationsbezogenen Bausteins .....	97
Abbildung 37: Zusammensetzung des verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteins .....	97
Abbildung 38: Zusammensetzung des dokumentationsbezogenen Bausteins...	98
Abbildung 39: Beispiel für einen ungerichteten Graphen (links) und einen gerichteten Graphen (Digraphen) (rechts) .....	102
Abbildung 40: Grundelemente eines Petri-Netzes und deren grafische Repräsentation.....	102
Abbildung 41: Generische Prozessstrukturen für die Modellierung von produktindividuellen Prozessketten mit den zugehörigen Schaltregeln .....	105
Abbildung 42: Beispielhaftes Petri-Netz eines Produktionsauftrages mit einer Ergänzungs-Struktur .....	107
Abbildung 43: Integration der Prozessbausteine in die produktindividuelle Prozesskette.....	108
Abbildung 44: Beispielhafte Darstellung des Zwischenstandes eines Produktionsauftrages.....	109

Abbildung 45: PNML-basierte Beschreibung der Transition „Fräsen“ mit den zugehörigen Elementen .....	111
Abbildung 46: Beispielhafte Integration eines organisationsbezogenen Bausteins in eine produktindividuelle Prozesskette .....	112
Abbildung 47: Referenzinformationsstruktur für die Beschreibung von Stationen .....	114
Abbildung 48: Erweitertes Grundobjekt für die Elemente Station und Ressource .....	115
Abbildung 49: Gliederung von Betriebsmitteln mit ihren Abhängigkeiten (in Anlehnung an VDI-RICHTLINIE 2815 1978) .....	116
Abbildung 50: Strukturierte Einteilung der technischen Informationen einer Ressource (statischer Modulbereich).....	118
Abbildung 51: Ausschnitt aus einer beispielhaften XML-basierten Stations- und Ressourcenbeschreibung .....	119
Abbildung 52: Statisches Klassendiagramm des Stations- und Ressourcenaufbaus in UML-Schreibweise.....	120
Abbildung 53: Gliederung von Produktqualitätsmerkmalen (in Anlehnung an DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1993, EHRENSPIEL 2009).....	126
Abbildung 54: Unterteilung der Wissensbasis in produktunabhängige und produktabhängige Regeln (in Anlehnung an OSTGATHE et al. 2011).....	128
Abbildung 55: Klassifizierung von produktspezifischen Handlungsmaßnahmen .....	129
Abbildung 56: Ablauf des wissensbasierten Störungsmanagements.....	131
Abbildung 57: Handlungsmaßnahmen bei einer unzureichenden Produktqualität .....	133
Abbildung 58: Kopplung des Material- und des Informationsflusses mit produkt- und prozessspezifischen Daten .....	137
Abbildung 59: Gegenüberstellung der Datenhaltungskonzepte Data-on-Network und Data-on-Tag.....	138

---

Abbildung 60:	Kommunikationsbeziehungen im System zur produktbasierten Steuerung .....	143
Abbildung 61:	Ressourcenauswahl und -belegung mit Hilfe der globalen Organisationseinheit durch die Interpretation von Prozessbausteinen .....	145
Abbildung 62:	Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleich für die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Fertigungs- und Montageressourcen .....	146
Abbildung 63:	Ausschnitt aus einem exemplarischen Ablaufplan mit den Eintreffzeitpunkten und den zugehörigen Durchlaufzeitanteilen .....	150
Abbildung 64:	Zeitlicher Verlauf des linearen Abwertungsfaktors für einen Auftrag an der Ressource $n$ .....	151
Abbildung 65:	Aufbau einer lokalen Organisationseinheit.....	154
Abbildung 66:	Regelkreis der Produktionssteuerung (in Anlehnung an SIMON 1995, BRINZER 2005).....	157
Abbildung 67:	Veränderung des Abwertungsfaktors bei einer Beschleunigung oder einer Verzögerung von Aufträgen .....	158
Abbildung 68:	Handlungsmöglichkeiten bei einer ressourcenbezogenen Störung .....	159
Abbildung 69:	Integration eines zusätzlichen Arbeitsvorganges in die produktindividuelle Prozesskette .....	161
Abbildung 70:	Demonstrationsplattform mit den einzelnen Fertigungs- und Montagestationen (Fotos: G. Sigl, <i>iwb</i> ) .....	166
Abbildung 71:	Übersicht der Ressourcen an einer Fertigungsstation (Foto: G. Sigl, <i>iwb</i> ) .....	167
Abbildung 72:	Komponenten des Beispielproduktes Getriebe (Foto: G. Sigl, <i>iwb</i> ) .....	168
Abbildung 73:	Statisches Klassendiagramm der globalen und der lokalen Organisationseinheit in UML-Schreibweise.....	171
Abbildung 74:	Benutzeroberfläche der globalen Organisationseinheit zur Eingabe, Verwaltung und Überwachung von Produktionsaufträgen .....	172

Abbildung 75: Statisches Klassendiagramm einer lokalen Organisationseinheit in UML-Schreibweise.....	175
Abbildung 76: Benutzeroberfläche einer lokalen Fertigungsstation .....	178
Abbildung 77: Architektur des wissensbasierten Systems zum autonomen Störungsmanagement (in Anlehnung an OSTGATHE et al. 2011) .....	179
Abbildung 78: Simulationsmaske zur Erfassung von Produktmerkmalen (in Anlehnung an OSTGATHE et al. 2011) .....	180
Abbildung 79: Beispielhafte Abbildung der Ist- und der Soll-Daten (Fakten) in der temporären Wissensdatei.....	181
Abbildung 80: Ergebnis der Qualitätsprüfung mit einem ausgewählten Nacharbeitsgang (in Anlehnung an OSTGATHE et al. 2011)....	182
Abbildung 81: Editor für die Bearbeitung, Ergänzung oder Entfernung von Regeln in der Wissensbasis .....	183
Abbildung 82: Aufbau des Simulationsmodells zur Validierung des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen.....	184
Abbildung 83: Veränderung der Zahl der fertiggestellten Aufträge in Abhängigkeit der Nacharbeitsquote für das Referenz- und für das Vergleichsmodell.....	188
Abbildung 84: Veränderung des Flussgrades in Abhängigkeit der Nacharbeitsquote für das Referenz- und für das Vergleichsmodell.....	189
Abbildung 85: Verlauf der Termineinhaltung in Abhängigkeit der Nacharbeitsquote für das Referenz- und für das Vergleichsmodell.....	191

---

## **Tabellenverzeichnis**

Tabelle 1:	Vergleich von RFID mit anderen Identifikationstechnologien (in Anlehnung an REINHART et al. 2007, FINKENZELLER 2008).....	51
Tabelle 2:	Übersicht der Sendefrequenzen für RFID-Systeme.....	53
Tabelle 3:	Charakteristische Eigenschaften zentraler und dezentraler Datenhaltungskonzepte (in Anlehnung an DIEKMANN et al. 2007, MELSKI & SCHUMANN 2008) .....	140
Tabelle 4:	Zusammenfassung der charakteristischen Merkmale und Eingangsparameter der untersuchten Simulationsmodelle .....	187



---

## Abkürzungsverzeichnis

ABFA	Abwertungsfaktor
Auto-ID	automatische Identifikation
AVG	Arbeitsvorgang
BDE	Betriebsdatenerfassung
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BOA	Belastungsorientierte Auftragsfreigabe
bzw.	beziehungsweise
CIM	Computer Integrated Manufacturing (Rechnerintegrierte Fertigung)
CNC	Computerized Numerical Control (Rechnergestützte Numerische Steuerung)
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DTD	Document Type Definition (Dokumenttypdefinition)
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
engl.	englisch
EPC	Electronic Product Code (elektronischer Produktcode)
EPCIS	Electronic Product Code Information Service
ERP	Enterprise Resource Planning (Planung der Unternehmensressourcen)
et al.	et alii (und andere)
FIFO	First-in-First-out
Fraunhofer ISI	Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung
ggf.	gegebenenfalls
GHz	Gigahertz

HF	High Frequency (Hochfrequenz)
HMS	Holonic Manufacturing System (Holonisches Fertigungssystem)
ISO	International Organization for Standardization (Internationale Organisation für Normung)
IuK-Technologie	Informations- und Kommunikationstechnologie
JIS	Just-in-Sequence
JIT	Just-in-Time
LF	Low Frequency (Niederfrequenz)
MDE	Maschinendatenerfassung
MES	Manufacturing Execution System (Produktionsleitsystem)
MHz	Megahertz
MRP II	Manufacturing Resources Planning
MW	Mikrowelle
NC	Numerical Control (Numerische Steuerung)
NP	nicht-deterministisch polynomial
NxBRE	.Net Business Rule Engine
OCR	Optical Character Recognition (optische Zeichenerkennung)
o. g.	oben genannt
OVF	Offene Virtuelle Fabrik
OPP	Order penetration point (Kundenentkopplungspunkt)
PBS	produktbasierte Steuerung
PNML	Petri Net Markup Language (Petri-Netz-Auszeichnungssprache)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
REFA	REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
RFID	Radio Frequency Identification (Radiofrequenz-Identifikation)

---

RuleML	Rule Markup Language (Regel-Auszeichnungssprache)
S.	Seite
SFB	Sonderforschungsbereich
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
TBE	Bearbeitungsende
TBEV	Bearbeitungsende des Vorgängers
TCP	Transmission Control Protocol (Übertragungssteuerungsprotokoll)
TFP	Total Factor Productivity (totale Faktorproduktivität)
TRA	Rüstanfang
u. a.	unter anderem
UHF	Ultra High Frequency (Ultrahochfrequenz)
UML	Unified Modeling Language (vereinheitlichte Modellierungssprache)
u. U.	unter Umständen
v. a.	vor allem
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
vgl.	vergleiche
W3C	World Wide Web Consortium
<i>WoPeD</i>	Workflow Petri Net Designer
XML	Extensible Markup Language (erweiterbare Auszeichnungssprache)
XSD	XML Schema Definition
z. B.	zum Beispiel



---

## Verzeichnis der Formelzeichen

$ABFA_{n0}$	initialer Abwertungsfaktor an Ressource $n$
$BZ_n$	Bearbeitungszeit an Ressource $n$
$BZ_{n\_ab}$	abgewertete Bearbeitungszeit an Ressource $n$
$EPS_n$	Einlastungsprozentsatz an Ressource $n$
$FG$	Flussgrad
$P$	Planungsperiode
$TZ_n$	Transportzeit von der vorgelagerten Arbeitsstation zur Arbeitsstation mit der Ressource $n$
$WZ_n$	durchschnittliche Wartezeit an der Arbeitsstation von Ressource $n$
$ZDF$	Durchführungszeit
$ZDL$	Durchlaufzeit
$ZUE$	Übergangszeit

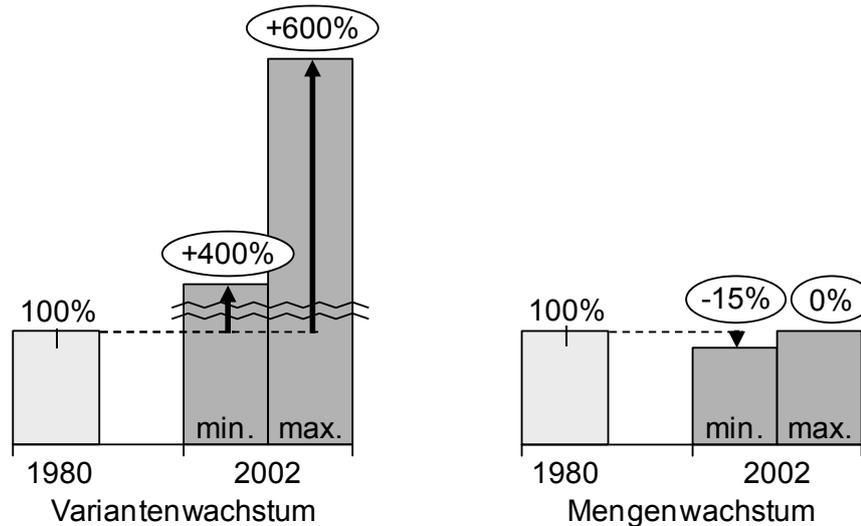


# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Als Henry Ford (\* 1863, † 1947) zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts das T-Modell auf den Markt brachte, soll er gesagt haben, dass jeder Kunde ein Fahrzeug in der Farbe seiner Wahl bekommen könne, solange diese schwarz sei (FORD & CROWTHER 1922). Für die einsetzende Fließbandfertigung bedeutete diese Vereinheitlichung eine erhebliche Verkürzung der Herstellungszeit sowie eine deutliche Vereinfachung der Produktion, um so der steigenden Nachfrage des Marktes gerecht zu werden (PILLER & STOTKO 2003). Bei einem personalisierten Produkt wie dem Auto, mit einer stetig steigenden Anzahl an Modellpaletten und Ausstattungsvarianten, ist eine Massenproduktion heute nicht mehr denkbar (DIEKMANN et al. 2007), denn das Ergebnis würde vom Kunden nicht mehr angenommen werden.

Die Fragmentierung der klassischen Massenmärkte im Sinne einer Heterogenisierung der Nachfrage ist nicht nur in der Automobilindustrie, sondern auch in vielen anderen Bereichen zu beobachten (PILLER 2006). Die Ursachen für die Entwicklung von kundenindividuellen Produkten liegen zum einen in einem kontinuierlich gestiegenen Anspruchsniveau der Kunden (LINDEMANN et al. 2006) und zum anderen in einer zunehmenden Marktsättigung, die zu einem Überangebot an Waren geführt hat (WESTKÄMPER 2006, BAUMBERGER 2007). Unternehmen können demnach nur erfolgreich im internationalen Wettbewerb bestehen, wenn sie durch den Ausbau ihres Leistungsangebotes eine Differenzierung gegenüber ihren Wettbewerbern erreichen (RÖHRIG 2002, PILLER & STOTKO 2003). Viele Unternehmen verstehen sich daher als Dienstleister für den Kunden und streben eine nahezu vollständige Erfüllung der Kundenwünsche an (WESTKÄMPER 2006). Die dargestellte Entwicklung war in den vergangenen Jahren insbesondere durch einen überproportionalen Anstieg der Anzahl an Produktvarianten im Vergleich zu einem stagnierenden bzw. rückläufigen Mengenwachstum gekennzeichnet (vgl. Abbildung 1) (WILDEMANN 2009b). Die erfolgreiche Umsetzung der Differenzierungsstrategie beruht daher auf der Beherrschung der Komplexität, die mit der Entwicklung und Herstellung kundenindividueller Produkte einhergeht, sowie der Kontrolle der dabei entstehenden Kosten (BIENIEK 2001, BAUMBERGER 2007).



Anzahl der befragten Unternehmen: 62

*Abbildung 1: Entwicklung der Variantenvielfalt und der Stückzahlen in stagnierenden Märkten (in Anlehnung an WILDEMANN 2009b)*

Mit der zunehmenden Individualisierung von Produkten ist ein Anstieg der hierfür benötigten variantenspezifischen Komponenten verbunden, während gleichzeitig der Umfang von standardisierten Bauteilen rückläufig ist (ADAM 2001). Die zunehmende Produktvarianz führt deshalb auch zu einer steigenden Produktkomplexität (BIENIEK 2001). Diese resultiert in zusätzlichen Aufwendungen im Bereich der Entwicklung und der Auftragsabwicklung (LINDEMANN & BAUMBERGER 2006, TONIGOLD 2008). Im Bereich der Entwicklung ist dies u. a. dadurch bedingt, dass die technische Komplexität der Produkte durch zusätzliche Funktionalitäten und neue Technologien stetig zunimmt (EVERSHEIM & SCHUH 2005). Beispielhaft genannt seien hier die fortschreitende Integration und Miniarisierung von mechanischen, elektronischen und informationstechnischen Komponenten (LINDEMANN et al. 2006).

In der Auftragsabwicklung kommt es aufgrund der Differenzierung durch Produktvarietät zu einer ansteigenden Teilekomplexität, die in der Beschaffung, Lagerhaltung, Bereitstellung, Produktion und Logistik koordiniert werden muss (ADAM 2001). Durch die hiermit verbundenen abnehmenden Losgrößen nimmt insbesondere in der Produktion die Anzahl der abzuwickelnden Aufträge zu. Zur Realisierung der gestiegenen Auftragsumfänge sind deshalb Investitionen in flexible Wertschöpfungssysteme (fixe Kosten) sowie erhöhte Aufwendungen für die Koordination, Planung und Steuerung der betrieblichen Abläufe (variable Kosten) notwendig (REICHWALD et al. 2006a). Insbesondere im Bereich der Produktion bestehen deshalb erhöhte Anforderungen hinsichtlich der produktions- und prozessbezogenen Flexibilität (GÜNTNER et al. 2006). Für die Herstellung

des breiten und anspruchsvollen Produktspektrums werden hochintegrierte, flexible Maschinen und Anlagen benötigt, die ein deutlich höheres Investitionsvolumen gegenüber herkömmlichen, spezialisierten Ressourcen für die Serien- und die Massenfertigung besitzen (ADAM 2001, BORNHÄUSER et al. 2005). Darüber hinaus übersteigt die angestrebte Nutzungsdauer der in der Fertigung und Montage eingesetzten Maschinen und Anlagen in der Regel bei Weitem die Lebensdauer der auf ihnen hergestellten Produkte. Dies bedeutet, dass die Ressourcen eine hohe Flexibilität nicht nur bezüglich der kundenindividuellen Produkte, sondern auch im Hinblick auf die Produktionszahlen und auf die sich verändernden Unternehmensprozesse aufweisen müssen (ELMARAGHY & WIENDAHL 2009, GÜNTHER & TEMPELMEIER 2009).

Unter den zuvor genannten Rahmenbedingungen stellt die Organisation nach dem Verrichtungsprinzip (Werkstattfertigung) mit komplexeren Materialflüssen als in produktorientierten Fertigungslinien die wirtschaftlichste Organisationsform zur flexiblen Anpassung an unterschiedliche Produkte und deren Bearbeitungsfolgen dar (BRINZER 2005, GÜNTNER et al. 2006, KLUBMANN 2009). Die Werkstattfertigung wird nach dem VDI (Verein Deutscher Ingenieure e.V.) als eine *„stufenweise Fertigung von Material oder Erzeugnissen in räumlich zusammenhängenden und entsprechend der Arbeitsaufgabe angeordneten ortsbundenen Arbeitsplätzen eines Teilbereichs bei vorgegebener Artenteilung und unter Einsatz von verschiedenen Arbeitskräften, die während der Arbeitsausführung die Arbeitsplätze wechseln“* (VDI 1992, S. 184), definiert. Die hohe Flexibilität bei einer Werkstattfertigung führt bei entsprechender Nutzung dazu, dass die Kapazitätsauslastung der Maschinen und Anlagen, u. a. durch erhöhte Rüstaufwände und umfangreichere Qualitätsprüfungen, abnimmt (ADAM 2001, WESTKÄMPER & ZAHN 2009). Um Kostensteigerungen in Folge geringerer Produktionsmengen und komplexerer Abläufe gegenüber der Serien- bzw. Massenfertigung kompensieren zu können, ist es von entscheidender Bedeutung, mit *„technologisch führenden Produkten und einer flexiblen und leistungsfähigen Produktion kundenspezifische Produkte höchster Qualität herstellen zu können“* (SCHIRRMEISTER et al. 2003, S. 72).

## 1.2 Problemstellung

In diesem sogenannten turbulenten Umfeld (WIENDAHL 2002) sind sowohl Produkte als auch Prozesse anfällig gegenüber kurzfristigen Änderungen der Märkte und der individuellen Kundenwünsche (LINDEMANN et al. 2006). Die marktbezogenen Turbulenzen haben wiederum Auswirkungen auf die Unternehmen und

die zugehörigen Planungsprozesse in der Produktion. Gründe hierfür können kurzzyklische Änderungen der Produktionsrahmenbedingungen (z. B. kurzer Produktlebenszyklus) und heterogene Anforderungen in unterschiedlichen Perioden (z. B. schwankende Bedarfsmengen) oder in derselben Periode (z. B. unterschiedliche Lieferzeitanforderungen) sein (BORNHÄUSER et al. 2005). Diese erlauben kaum zuverlässige Bedarfsprognosen und resultieren in immer häufigeren Anpassungen von Produktionszielen. Die Erstellung verlässlicher Produktionsprogramme wird hierdurch zunehmend erschwert (LÖDDING 2008b). WIENDAHL (2002) sieht daher einen Wandel der Produktionsstrategien von standardisierten zu individualisierten Abläufen. In Abbildung 2 sind die beschriebenen Produktionsstrategien mit der Mischform *Segmentierung* und den jeweiligen charakteristischen Eigenschaften zusammenfasst.

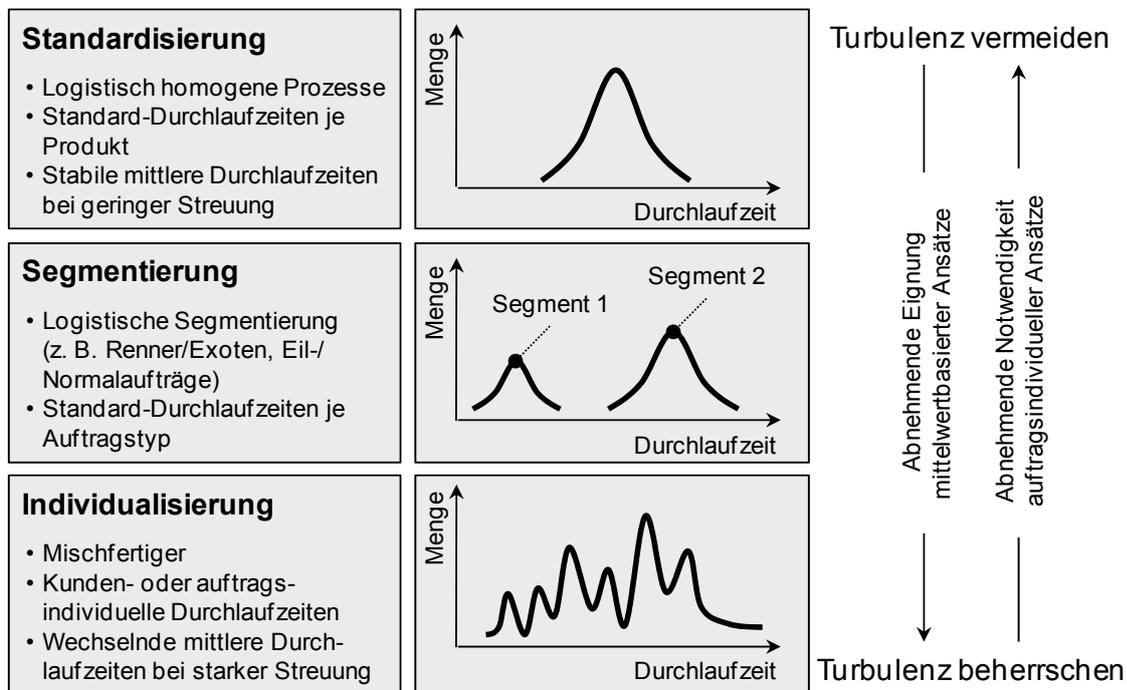


Abbildung 2: Veränderte Produktionsstrategien im turbulenten Umfeld (in Anlehnung an WIENDAHL 2002)

Standardisierte Abläufe sind durch eine *flussorientierte Strategie* gekennzeichnet, deren Ziel es ist, einen gleichmäßigen Fluss an Aufträgen zu erzeugen. Externe Einflussgrößen, wie bspw. Bedarfsschwankungen, werden vor der Produktion geglättet. Dies führt dazu, dass Eil-, Kunden- und Lageraufträge bei der Planung und Auftragsdurchführung gleichbehandelt werden und so nur eine geringe Durchlaufzeitstreuung erfahren. Die homogenen Abläufe ermöglichen die Anwendung von mittelwertbasierten Ansätzen zur Planung von Abläufen (z. B. MRP II (Manufacturing Resources Planning)). Das genannte Leitbild kann durch die *Vermeidung von Turbulenzen* beschrieben werden. Die *turbulenzorientierte*

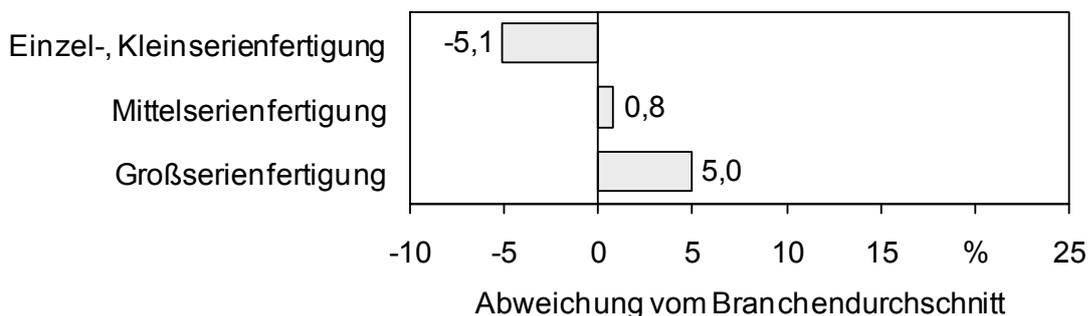
*Strategie* hingegen realisiert einen heterogenen Fluss von Aufträgen, der durch eine hohe Durchlaufzeitstreuung gekennzeichnet ist. Hieraus leitet sich die Notwendigkeit einer individuellen Planung und Bearbeitung von Produktionsaufträgen ab, um eine hohe Termin- und Liefertreue sicherzustellen. Diese Strategie wird von WIENDAHL (2002) mit der *Beherrschung von Turbulenz* umschrieben.

Die dargestellte individuelle Planung und Durchführung von Produktionsabläufen führt zu einem erhöhten Informations- und Koordinationsbedarf in der Produktion (GÜNTNER et al. 2006, REICHWALD et al. 2006a). Dieser Mehraufwand ist u. a. durch die variantenspezifische Disposition von Maschinen und Anlagen sowie der zugehörigen Arbeitspläne, Bauteile und Baugruppen bedingt (FRANKE 2002). Ferner müssen spezifische Kundeninformationen in den Produktionsablauf integriert werden (REICHWALD et al. 2006a). Die daraus resultierende Komplexität wird oft zusätzlich durch Freiheitsgrade bei der Maschinenbelegung, der Arbeitsvorgangsreihenfolge oder durch alternative Arbeitsvorgänge verstärkt (PILLER 2006). Aufgrund der Vielzahl von unterschiedlichen Auftragsströmen und Bearbeitungsschritten sind die Auswirkungen der zuvor genannten Turbulenzen insbesondere bei einer verrichtungsbezogenen Organisationsform gravierend und schwer vorhersehbar (BRINZER 2005). Das hat zur Folge, dass Produktionsaufträge nur in wenigen Fällen entsprechend der ursprünglichen Planungen realisiert werden können (HEIDERICH 2001).

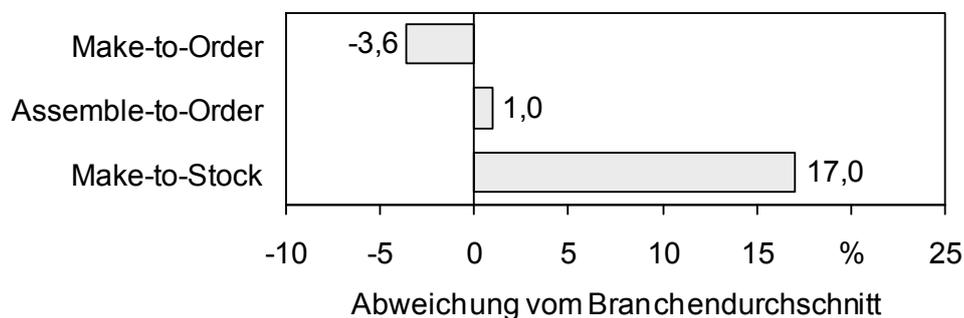
Dies wird auch durch die Studie „Stellhebel für mehr Produktivität“ des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung (ISI) (LAY et al. 2009) bestätigt. An der Umfrage nahmen ca. 1.600 Unternehmen aus dem verarbeitenden Gewerbe teil. Die Untersuchungen belegen, dass die Produktivität in einem Unternehmen maßgeblich von den strukturellen Rahmenbedingungen, wie beispielsweise der Branche, der Fertigungsart und der Organisationsform, abhängt. So liegt die Produktivität bei Unternehmen aus dem Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung im Mittel ungefähr 5 % unter dem Durchschnitt aller Betriebe des verarbeitenden Gewerbes. Mit einem Vorsprung von etwa 5 % gegenüber dem Mittelwert erreichen die Unternehmen aus dem Bereich der Großserienfertigung hingegen eine überdurchschnittliche Produktivität (vgl. Abbildung 3a). Die Produktivität wurde mit Hilfe der *Total Factor Productivity* (TFP) gemessen. Diese ergibt sich aus dem Verhältnis der betrieblichen Wertschöpfung und der Summe der jährlichen Ausgaben für Personal und Abschreibungen. Im Durchschnitt beträgt die jährliche Wertschöpfung des verarbeitenden Gewerbes in Deutschland in etwa das 1,8-fache der Summe aus jährlichen Personalkosten und Abschreibungen.

Der Aufwand für die Herstellung von Produkten mit einer hohen Variantenvielfalt hängt vom Zeitpunkt der Integration des Kunden in den Wertschöpfungsprozess ab (FRANKE 2002). Je umfangreicher die variantenspezifischen Anteile im Herstellungsprozess sind, desto höher sind die Aufwendungen für die Erstellung der individuellen Unternehmensleistungen (vgl. Abschnitt 2.2 ab Seite 13). Durch geringere Wiederholungsgrade nimmt der Anteil an unproduktiven Neben- und Stillstandszeiten zu und es können keine Skaleneffekte erzielt werden (ADAM 2001). Abbildung 3b stellt die prozentualen Abweichungen der Produktivität in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Kundenintegration dar. Die frühe Berücksichtigung von Kundenwünschen hat eine Reduzierung der Produktivität von etwa 3,6 % gegenüber dem Durchschnitt im verarbeitenden Gewerbe zur Folge. Bei einer kundenneutralen Fertigung auf Lager (Make-to-Stock) kann aufgrund einer hohen Produktstandardisierung und mit Hilfe einer verketteten Fließfertigung eine hohe Produktivität erreicht werden. In der Studie des Fraunhofer ISI lag die Produktivität der befragten Unternehmen aus diesem Bereich im Mittel 17 % über dem Durchschnitt (LAY et al. 2009).

a) Prozentuale Abweichungen der Produktivität in Abhängigkeit der Fertigungsart



b) Prozentuale Abweichungen der Produktivität in Abhängigkeit des Zeitpunktes der Kundenintegration



---

Anzahl der befragten Unternehmen: 1.600

Abbildung 3: *Prozentuale Abweichungen der Produktivität vom Durchschnitt des verarbeitenden Gewerbes (in Anlehnung an LAY et al. 2009)*

Um auf die marktseitig vorgegebene Flexibilität reagieren und sich auf diese Weise Wettbewerbsvorteile sichern zu können, liegen die Herausforderungen daher insbesondere in der Flexibilisierung von Wertschöpfungsprozessen (LINDEMANN et al. 2006, NYHUIS & WIENDAHL 2009). Ein Unternehmen muss demnach „*so beweglich sein wie der Markt selbst*“ (NYHUIS & WIENDAHL 2003, S. 1). In diesem Zusammenhang müssen Unternehmen insbesondere auf das Erreichen der am Markt relevanten Leistungsziele *Qualität, Kosten* und *Zeit* achten (WESTKÄMPER 2006). In den letzten Jahren hat im Speziellen der Faktor *Zeit* gegenüber den Faktoren *Qualität* und *Kosten* an Bedeutung gewonnen. Zahlreiche Untersuchungen belegen, dass Kunden zunehmend Wert auf kürzere Lieferzeiten und eine exakte Einhaltung der zugesagten Liefertermine legen (WIENDAHL et al. 2006). Unternehmen mit einer hohen logistischen Zielerreichung sind „*erfolgreicher als ihre langsameren, unpünktlicheren und bestands-trägen Wettbewerber*“ (NYHUIS ET AL. 2006, S. 199).

In der betrieblichen Praxis gibt es diesbezüglich jedoch Defizite, die dazu führen, dass unrealistische Liefertermine definiert und Lieferfristen nicht eingehalten werden können. In der Studie „*Liefertreue im Maschinenbau*“ (SCHUH & WESTKÄMPER 2006) wurden 80 Unternehmen aus dem Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus zu den Gründen für das Nichterreichen des Leistungsziels *Zeit* befragt. Als Ursache für die Definition von unrealistischen Lieferterminen wurden für den Bereich der Planung insbesondere ungenügende Stammdaten (z. B. Kapazitäts- und Materialstammdaten) genannt. Durch die unzureichende Rückmeldung von Daten aus der Produktion und eine inkonsequente Auftragssteuerung können zugesagte Liefertermine gegenüber den Kunden nicht eingehalten werden. 35 % der Unternehmen, die weitestgehend im Bereich der Einmal-, Einzel- oder Kleinserienfertigung tätig sind, gaben an, dass der innerbetriebliche Auftragsfortschritt nicht transparent sei. Dieser ist einerseits durch unterschiedliche Rückmelderaster bzw. einen Zeitverzug bei der Rückmeldung und andererseits durch nicht anforderungsgerechte Rückmelderaster gekennzeichnet.

Die unzureichende Rückmeldung von Daten aus der Produktion wird auch durch eine Studie des Fraunhofer ISI bestätigt. Demnach wurden nur bei etwas mehr als der Hälfte der befragten Industrieunternehmen Systeme zur Betriebsdatenerfassung (BDE) eingesetzt. In mehr als 60 % dieser Fälle wurden die BDE-Systeme nur als Insellösung für statistische Auswertungen genutzt (BECKERT & HUDETZ 2002). Durch die fehlende Anbindung an bestehende betriebliche Planungs- und Informationssysteme sind rechtzeitige und angemessene Reaktionen im Fall von unvorhergesehenen Ereignissen oder Störungen jedoch nicht möglich.

Viele der beschriebenen Herausforderungen lassen sich mit herkömmlichen Planungs- und Steuerungskonzepten nicht mehr zufriedenstellend bewältigen. Die frühzeitige Berücksichtigung von Kundenwünschen erfordert einen höheren Anteil an kundenbezogenen Produktionsprozessen und resultiert in einer zunehmenden Steuerungskomplexität in der Fertigung und in der Montage (KLUBMANN 2009). In diesem Zusammenhang kommt der Transparenz innerhalb der Wertschöpfungskette, mit einer gut ausgeprägten Informationslogistik, eine große Bedeutung zu. Diesbezüglich bestehen in heutigen Produktionsumgebungen Defizite hinsichtlich des aktuellen Zustandes und Fortschrittes der Auftragsbearbeitung (HEIDERICH 2001, SCHUH & WESTKÄMPER 2006, KLUBMANN 2009). Durch eine Verbesserung der Informationsqualität bezüglich Aktualität und Detailliertheit, eine Reduzierung der Übermittlungszeiten und eine Verringerung des Abstimmungsaufwandes können unvorhergesehene Ereignisse frühzeitig identifiziert werden. In der Folge können entsprechende Gegenmaßnahmen zur Störungsbeseitigung und zur Minimierung der Störungsauswirkungen eingeleitet werden (KLETTI 2006, LASSEN 2006). Daraus resultiert das Potenzial zum Abbau von Sicherheitsbeständen und zur Reduzierung von Durchlaufzeiten im Wertschöpfungsprozess. Dies trägt dazu bei, dass die von den Kunden wahrgenommene Logistikleistung, gemessen an der Lieferzeit und der Liefertreue, verbessert werden kann.

Die Bedeutung der genannten Themenbereiche wird durch eine Studie bestätigt (WILDEMANN 2009a). Die befragten Unternehmen gaben darin an, dass sie eine Erhöhung der Transparenz (60,4 %) und eine Verbesserung der Termintreue (54,7 %) anstreben. 67,9 % sehen weiterhin Bedarf nach einer Reduzierung der Bestände, während 58,5 % eine Verringerung der Durchlaufzeiten zum Ziel haben.

### **1.3 Zielsetzung**

Die dargelegte Ausgangssituation und Problemstellung verdeutlichen, dass insbesondere im Bereich der auftragsbezogenen Produktion ein bedeutend höherer Grad an Flexibilität in Bezug auf Stückzahlen, Produktvarianten und Produktionsdurchläufen erforderlich ist. Dieser kann durch einen erhöhten Kundenauftragsbezug in der Produktion und Logistik erreicht werden.

Als vielversprechender Ansatz zur effizienten Handhabung der zunehmenden Komplexität und zur Steigerung der Flexibilität im Bereich der auftragsbezogenen Fertigung und Montage wird im Rahmen dieser Arbeit das individuelle Produkt, welches als zusätzliches Element zur Steuerung der Produktion ge-

nutzt wird, identifiziert. Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien (IuK-Technologien) ermöglichen die dezentrale Speicherung von Informationen bezüglich der Konfiguration, des aktuellen Zustandes und der einzelnen Arbeitsvorgänge direkt am Bauteil. Die resultierende Kopplung des Material- und Informationsflusses erlaubt eine zustandsbezogene Steuerung des Werkstückes durch den Wertschöpfungsprozess. Bei der Bearbeitung eines Erzeugnisses können zudem aktuelle, produktspezifische Informationen (z. B. Qualitätsdaten) in den Prozess integriert werden.

Das Gesamtziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Systems zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Dieses soll die effiziente Handhabung eines hochvariantenreichen Produktionsprogramms mit kleinen Stückzahlen in einer hochautomatisierten Umgebung ermöglichen. Neben der produktzustandsbezogenen Durchführung von Arbeitsvorgängen soll mit Hilfe des zu entwickelnden Systems auch eine Steuerung des Produktionsablaufes in Abhängigkeit des Fabrikkontextes (z. B. Verfügbarkeit von Ressourcen) ermöglicht werden. Wie in Abbildung 4 dargestellt, sind zur Erreichung des Gesamtziels die drei Teilelemente Datenmodell, wissensbasiertes System und Organisationsstruktur zu betrachten.

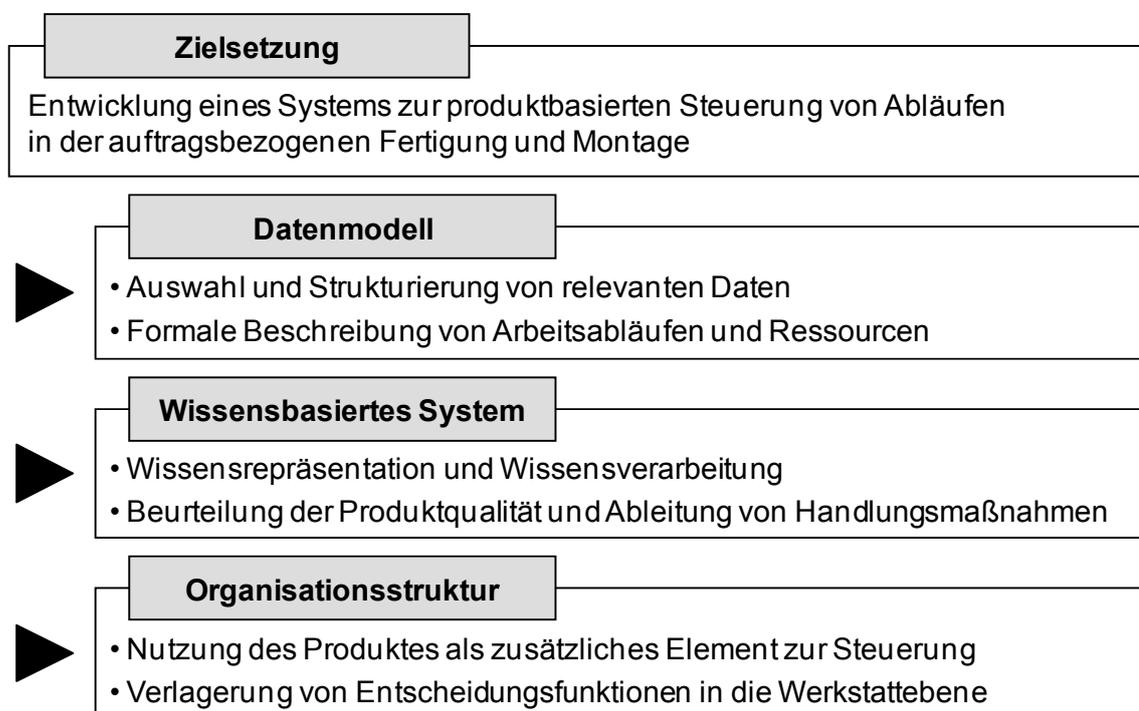


Abbildung 4: Zielsetzung und Schwerpunkte der Arbeit

Um eine aufwandsarme Adaption des Arbeitsplans bei einer vorliegenden produkt- oder ressourcenbezogenen Störung zu gewährleisten, muss das *Datenmodell* einerseits eine modulare Beschreibung von Produktionsabläufen ermögli-

chen. Neben einer auftragsunabhängigen und ressourcenneutralen Darstellung sollen in diesem Zusammenhang mögliche Freiheitsgrade bei der Maschinenbelegung, bei der Arbeitsvorgangsreihenfolge oder hinsichtlich alternativer Arbeitsvorgänge berücksichtigt werden. In Ergänzung zu den organisatorischen und arbeitsvorgangsbezogenen Angaben zum Auftrag muss die formale Beschreibung im Hinblick auf die übergeordnete Zielsetzung auch Informationen zum aktuellen Zustand eines Erzeugnisses enthalten. Andererseits muss das Datenmodell eine Modellierung der vorhandenen Maschinen und Anlagen ermöglichen. In Kombination mit der formalen Beschreibung des Fertigungs- und Montageablaufes ist so ein rechnergestützter Abgleich der auftragsbezogenen Anforderungen mit den ressourcenspezifischen Fähigkeiten sicherzustellen.

Auf Basis des Datenmodells soll ein *wissensbasiertes System* entwickelt werden, welches fehlerhafte Erzeugnisausprägungen (z. B. Maßfehler, Oberflächenfehler) identifiziert und mögliche Handlungsmaßnahmen zur Behebung ableitet. Unter Berücksichtigung des Ergebnisses ist der Produktionsablauf automatisiert anzupassen. Neben der Auswahl von wesentlichen Produktqualitätsmerkmalen gilt es eine geeignete Wissensrepräsentation für das Aufgabengebiet und den zugehörigen Ablauf zum autonomen Störungsmanagement zu definieren.

Zur Erreichung einer produktzustandsbezogenen Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen muss das Werkstück mit den zugehörigen Informationen in die *Organisationsstruktur* eines Produktionssystems integriert werden. Um die produkt- und prozessspezifischen Daten berücksichtigen zu können, müssen die jeweiligen Arbeitsstationen über Entscheidungsfreiräume bei der Durchführung von Arbeitsvorgängen verfügen. Bei der Entwicklung der Organisationsstruktur sind die hierfür notwendigen Entscheidungskompetenzen der lokalen Organisationseinheiten und die Interaktion mit dem Produkt festzulegen. In diesem Zusammenhang sind das zuvor entwickelte Datenmodell und das wissensbasierte System zum autonomen Störungsmanagement in die Organisationsstruktur und die zugehörigen Abläufe einzubinden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Schwerpunkt auf die drei zuvor genannten Teilelemente und die Zusammenführung dieser zu einem Gesamtsystem gelegt. Die Entwicklung von neuen Steuerungsprinzipien und die Optimierung von bestehenden Verfahren zur Auftragsfreigabe oder Reihenfolgeplanung sind nicht Bestandteil dieser Arbeit. Für die prototypische Umsetzung und Validierung sollen bestehende Steuerungsverfahren, die in sogenannten Planungsbibliotheken hinterlegt sind, beispielhaft in die Organisationsstruktur integriert werden.

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Um die im vorhergehenden Abschnitt definierten Ziele zu erreichen, gliedert sich die Arbeit in neun Kapitel (vgl. Abbildung 5). Nach der einführenden Darstellung der Ausgangssituation, der resultierenden Problemstellung und der abgeleiteten Zielsetzung der vorliegenden Arbeit werden in *Kapitel 2* die Grundlagen der auftragsbezogenen Produktion erläutert. Dies umfasst die Darstellung bestehender Individualisierungskonzepte sowie die Diskussion der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Flexibilitätsbereiche und -merkmale. Die Ausführungen werden durch die Grundlagen zur Planung und Steuerung von Produktionsabläufen ergänzt. Zum Abschluss des Kapitels werden einige grundlegende Begriffe aus dem Bereich der Informationslogistik erläutert und die Relevanz für die Produktionsplanung und -steuerung dargelegt.

Basierend auf den Grundlagen in Kapitel 2 werden im *dritten Kapitel* die allgemeinen Anforderungen an das System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage definiert.

Der für die vorliegende Arbeit relevante Stand der Forschung und Technik wird in *Kapitel 4* aufgezeigt. Im Hinblick auf die Zielsetzung erfolgt die Schwerpunktsetzung auf die adaptive Steuerung von Produktionsabläufen (Abschnitt 4.2), auf bestehende Ansätze zum autonomen Störungsmanagement (Abschnitt 4.3) sowie auf die Modellierung von Produktionsabläufen (Abschnitt 4.4).

Die erarbeiteten Anforderungen und die Ergebnisse aus dem Stand der Forschung und Technik dienen als Grundlage für die Entwicklung der einzelnen Elemente des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen in den Kapiteln 5, 6 und 7. Im *fünften Kapitel* wird das Datenmodell für adaptive Produktionssysteme, welches sämtliche Daten für die Durchführung von Produktionsabläufen strukturiert abbildet, vorgestellt.

Durch die Berücksichtigung des Grundelementes *Produkt* im Datenmodell werden die Voraussetzungen für die Entwicklung eines wissensbasierten Systems zum autonomen Störungsmanagement in *Kapitel 6* gelegt. Dieses erlaubt die regelbasierte Identifizierung von werkstückbezogenen Merkmalsabweichungen und die Ableitung von möglichen Handlungsmaßnahmen.

Aufbauend auf den Ergebnissen aus dem fünften und sechsten Kapitel wird in *Kapitel 7* die Organisationsstruktur für das System zur produktbasierten Steuerung entwickelt. Die hybride Organisationsstruktur ermöglicht die Berücksichtigung von produktspezifischen Daten (z. B. Qualitätsdaten) im Wertschöpfungs-

prozess und die produktzustandsbezogene Anpassung von Fertigungs- und Montageabläufen.

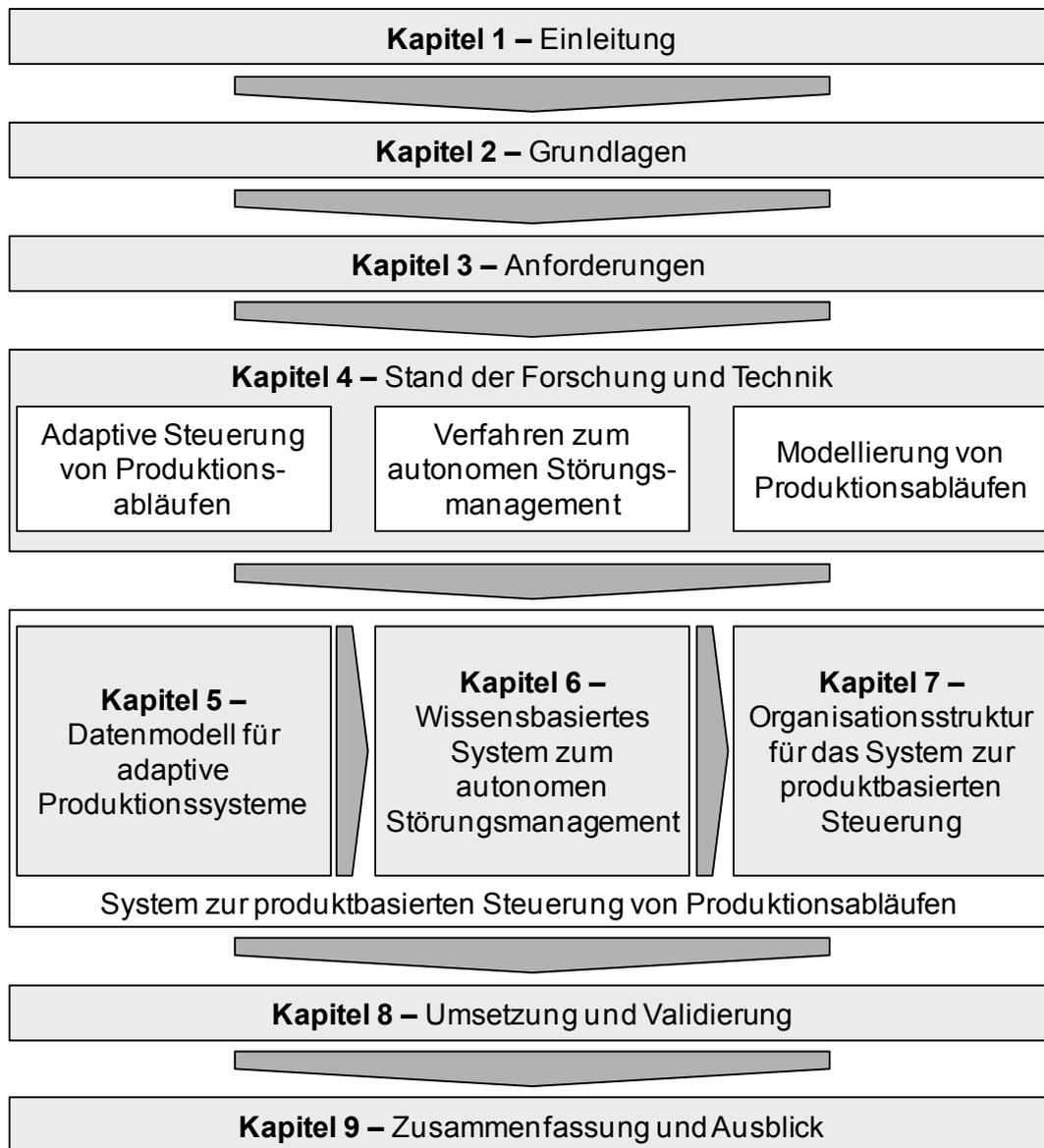


Abbildung 5: Aufbau der Arbeit

In *Kapitel 8* wird die prototypische Umsetzung und Validierung des entwickelten Systems beschrieben. Dies umfasst die softwaretechnische Integration der einzelnen Bestandteile in eine produktionstechnische Versuchsanlage, die aus den wesentlichen Elementen eines realen Produktionssystems besteht. Ergänzend hierzu wird mit Hilfe eines Simulationsmodells ein quantitativer Nachweis über den Nutzen und die Leistungsfähigkeit erbracht.

Zum Abschluss der Arbeit werden in *Kapitel 9* die Ergebnisse zusammengefasst. Darauf aufbauend wird ein Ausblick auf mögliche Ergänzungen und Weiterentwicklungen im Bereich der produktbasierten Steuerung von Abläufen gegeben.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Übersicht

Auf Basis der dargestellten Ausgangssituation und Problemstellung werden im vorliegenden Kapitel die Grundlagen der auftragsbezogenen Produktion diskutiert und in den Kontext der vorliegenden Arbeit gesetzt. Hierfür wird in Abschnitt 2.2 zunächst auf die wesentlichen Individualisierungskonzepte eingegangen. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 2.3 die Bedeutung der Flexibilität für die auftragsbezogene Produktion dargelegt, die verschiedenen Ausprägungen diskutiert und abschließend die für die Arbeit relevanten Flexibilitätsmerkmale herausgearbeitet. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit werden im Anschluss daran (vgl. Abschnitt 2.4) die Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung mit den zugehörigen Aufgaben und den logistischen Zielgrößen erläutert. Zum Abschluss des Kapitels wird in Abschnitt 2.5 die Relevanz der Informationslogistik für die Auftragsabwicklung in der Produktion aufgezeigt. Dies wird durch die grundlegende Erläuterung und Definition der wichtigsten Begrifflichkeiten aus dieser Domäne ergänzt.

### 2.2 Individualisierungskonzepte

Zur Abgrenzung des Einsatzbereiches des zu entwickelnden Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen ist es essentiell, auf die Formen der Kundenintegration in den Wertschöpfungsprozess einzugehen. Die Ausprägung der Individualisierung hängt vom Zeitpunkt der Einbindung des Kunden in den Entwicklungs- und Herstellungsprozess ab (MINTZBERG 1988) und wird durch Individualisierungsoptionen beschrieben (REICHWALD et al. 2006b). In der Literatur wird in diesem Zusammenhang zwischen der *offenen Individualisierung* und der *geschlossenen Individualisierung* differenziert (COATES 1995). Sie sind Teil des Konzeptes der sogenannten *kundenindividuellen Massenproduktion* (*Mass Customization*). Dieser Begriff bezeichnet nach PILLER (2006, S. 161) die „*Produktion von Gütern und Leistungen, welche die unterschiedlichen Bedürfnisse jedes einzelnen Nachfragers dieser Produkte treffen, mit der Effizienz einer vergleichbaren Massen- bzw. Serienproduktion*“. Die kundenindividuelle Massenproduktion verfolgt somit das Ziel, die Wettbewerbsstrategien Differenzierung (Flexibilität) und Kostenführerschaft (Produktivität) miteinander zu verknüpfen (PILLER 2006).

Bei der *offenen Individualisierung* (soft customization) werden einige wenige Produktvarianten kundenneutral und in großer Stückzahl hergestellt. In der Produktentwicklung wird jedoch die Möglichkeit einer Produktindividualisierung durch den Vertrieb oder während des Gebrauchs vorgesehen. Bei der Individualisierung im Vertrieb wird dem Kunden durch Beratung und durch die Bündelung von vorgefertigten Produkten eine kundenspezifische Lösung angeboten. Bei der Selbstindividualisierung wird die Anpassung während des Gebrauchs durch den Kunden durchgeführt (PILLER & STOTKO 2003, PILLER 2006).

Die *geschlossene Individualisierung* (hard customization) berücksichtigt die individuellen Kundenwünsche dagegen bereits bei der Produktentwicklung, bei der Konstruktion, bei der Fertigung, spätestens jedoch bei der Zusammenstellung von standardisierten Komponenten in der Endmontage. Im Vergleich zur offenen Individualisierung weisen die dahinter stehenden Auftragsabwicklungsprozesse eine höhere Komplexität auf, bieten gleichzeitig aber auch die Möglichkeit zur flexiblen Gestaltung von Leistungen (PILLER & STOTKO 2003).

Die unterschiedlichen Konzepte der kundenindividuellen Massenproduktion werden in der Literatur häufig hinsichtlich der Kriterien Individualisierungsgrad und -zeitpunkt charakterisiert. Nach EIDENMÜLLER (1995), SCHUH et al. (2006) und WIENDAHL (2010) werden vier unterschiedliche Formen der Kundenintegration unterschieden (vgl. Abbildung 6). Der Kundenentkopplungspunkt (engl. order penetration point (OPP)) entspricht dem Zeitpunkt im Wertschöpfungsprozess, zu dem die individuelle Leistungserstellung für ein Produkt beginnt. Der Herstellungsprozess lässt sich daher in einen kundenanonymen und einen kundenbezogenen Teil unterteilen. Im kundenanonymen Teil erfolgt die Produktion auf Basis von Vorhersagen und Plänen. Erst beim OPP bekommt das Produkt einen Kundenbezug und die Produktion ist durch den Kundenauftrag getrieben.

Die *kundenspezifische Einmalfertigung* (Design-to-Order) ist die höchste Form der Kundenintegration und umfasst die Entwicklung, Konstruktion, Fertigung und Montage von speziellen, meist hochgradig komplexen Produkten, wie sie beispielsweise im Maschinen- und Anlagenbau anzutreffen sind. Der Kunde besitzt während der gesamten Dauer der Auftragsabwicklung einen großen Einfluss auf die Produktausprägung (HELLMICH 2003, SCHUH et al. 2006).

Bei der *Auftragsfertigung kundenspezifischer Varianten* (Make-to-Order) wird der Wertschöpfungsprozess durch eine konkrete Kundenbestellung ausgelöst. Der Herstellungsprozess erfolgt auf Basis der auftragspezifischen Informationen. Auf die Entwicklung und auf die Prozessplanung hat der Kunde in der Regel jedoch keinen Einfluss. Die auftragsbezogene Fertigung ist meist als Einzel- oder Kleinserienfertigung organisiert (PILLER 2006, SCHUH et al. 2006).

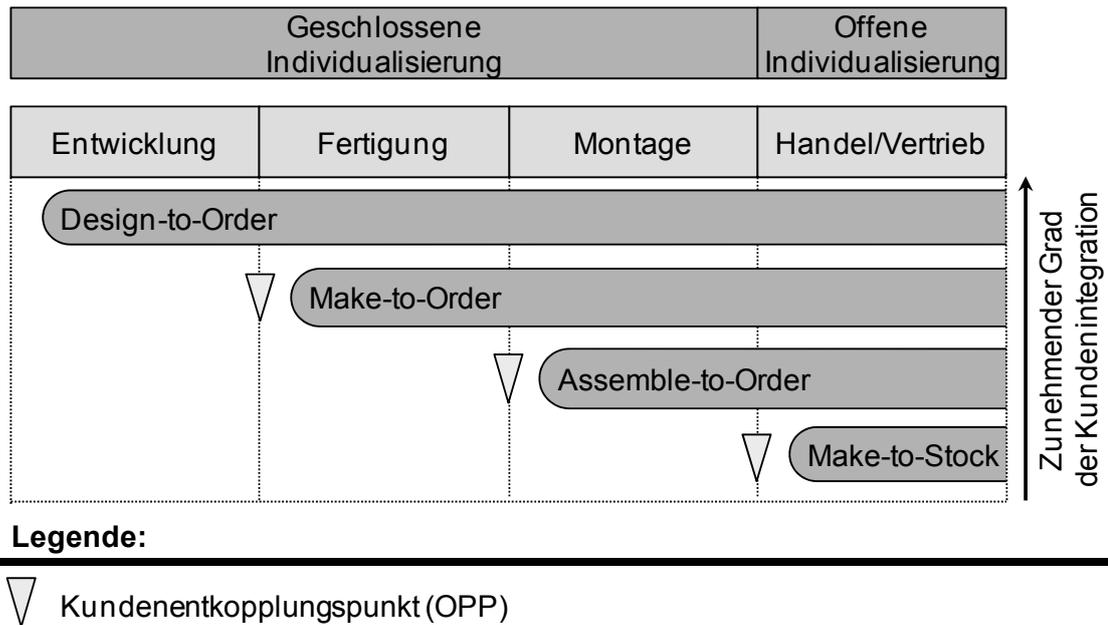


Abbildung 6: Darstellung verschiedener Individualisierungskonzepte mit den jeweiligen Zeitpunkten der Kundenintegration (in Anlehnung an EIDENMÜLLER 1995, PILLER & STOTKO 2003)

In der *Variantenmontage* (Assemble-to-Order) ist der Einfluss des Kunden auf die Ausprägung von Produkten sehr gering. Der Wertschöpfungsprozess ist durch eine kundenanonyme Vorfertigung und eine kundenspezifische Endmontage durch die Kombination von Standardkomponenten gekennzeichnet. In der Vorfertigung werden standardisierte Komponenten auf Basis von Annahmen und Marktprognosen hergestellt (HELLMICH 2003, SCHUH et al. 2006).

Im Bereich der *Lagerfertigung* (Make-to-Stock) ist der Wertschöpfungsprozess durch eine vollständige Entkopplung von Produktionsprozess und Kundenauftrag gekennzeichnet. Die Herstellung von standardisierten Produkten in der Serien- und Massenfertigung erfolgt kundenanonym auf Basis von Absatzprognosen. Aufgrund der Produktion auf Lager können Kundenaufträge im Allgemeinen kurzfristig erfüllt werden (HELLMICH 2003, SCHUH et al. 2006).

Durch die Einbeziehung des Kunden in den Wertschöpfungsprozess können, in Abhängigkeit des Kundenentkopplungspunktes, eine große Anzahl unterschiedlicher Produktvarianten hergestellt werden. Dem Vorteil von tendenziell niedrigeren Lagerbeständen steht hier der Nachteil von längeren Lieferzeiten im Vergleich zur Lagerfertigung gegenüber (LOPITZSCH 2005). Wenn die Vorhaltung von kundenanonymen Ausgangs- oder Zwischenprodukten notwendig ist, wird von vielen Unternehmen eine Verschiebung des Kundenentkopplungspunktes hin zum Ende des Wertschöpfungsprozesses angestrebt. Dadurch können kürzere Auftrags-Durchlaufzeiten und eine erhöhte Liefertreue bei gleichzeitig niedrigen

Lagerbeständen an Fertigwaren gewährleistet werden. Im Weiteren werden durch eine hohe Standardisierung die Materialflüsse im kundenanonymen Bereich der Produktion vereinfacht und die Steuerungskomplexität wird reduziert (RÖHRIG 2002). Wenn eine späte Kundenintegration in den Wertschöpfungsprozess aufgrund der produkt- und prozessspezifischen Rahmenbedingungen nicht möglich ist, bedeutet dies eine geringere Standardisierung im Herstellungsprozess und somit hohe Flexibilitätsanforderungen an das Produktionssystem (KLUBMANN 2009). In beiden Fällen gilt, dass die Lieferzeit ab dem Zeitpunkt der Kundenintegration maßgeblich von der Durchlaufzeit in der Produktion bestimmt wird.

Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird die Auftragsfertigung auf Erzeugnisse, die nach der Design-to-Order- und der Make-to-Order-Strategie hergestellt werden, eingeschränkt. Hierbei wird ein Produktionsauftrag erst dann freigegeben, wenn ein entsprechender Kundenauftrag vorliegt. Charakteristisch für diese Art der Fertigung ist es, dass jedem in der Fertigung befindlichen Werkstück ein Kundenauftrag zugeordnet ist.

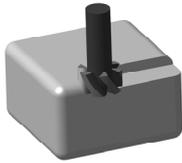
### 2.3 Flexibilität

Im vorhergehenden Teil der Arbeit wurde die Flexibilität als eine bedeutende Anforderung für die effiziente Durchführung von Wertschöpfungsprozessen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage herausgestellt. Diese Anforderung resultiert insbesondere aus der zunehmenden Produktindividualisierung mit den einhergehenden höheren Anteilen an kundenspezifischen Produktionsprozessen, die mit einer zunehmenden Steuerungskomplexität verbunden sind. Unter dem Begriff *Flexibilität* wird die Fähigkeit von Menschen (oder Systemen) verstanden, sich wechselnden Situationen rasch anzupassen (DUDEN 2010). Nach ABELE & REINHART (2011, S. 19) bezeichnet der Begriff Flexibilität die Fähigkeit, sich „*vorhersehbaren Veränderungen der Unternehmensumwelt möglichst kostengünstig anzupassen*“. KALUZA & BLECKER (2005, S. 9) definieren Flexibilität als „*die Eigenschaft eines Systems, proaktive oder reaktive sowie zielgerichtete Änderungen der Systemkonfiguration zu ermöglichen, um die Anforderungen von sich verändernden Umweltdingungen zu erfüllen*.“ Der zeitliche Rahmen, in dem diese Änderungen auftreten bzw. durchgeführt werden, können kurz-, mittel- oder langfristig sein (SPATH et al. 1996).

In der Literatur werden verschiedene Klassifizierungen von Flexibilitätsbereichen vorgeschlagen. SETHI & SETHI (1990) unterscheiden zwischen ressourcenbezogenen, systembezogenen und den daraus resultierenden allgemeinen Flexibilitätsbereichen Programm-, Produktions- und Marktflexibilität. KALUZA (1984)

hingegen führt die Bereiche *quantitative* bzw. *kapazitative Flexibilität*, *qualitative* bzw. *technologische Flexibilität* und *strukturelle Flexibilität* ein. In Anlehnung an KALUZA (1984) schlägt WILDEMANN (1998) eine Klassifizierung hinsichtlich quantitativer, qualitativer und zeitlicher Flexibilität vor. LOTTER et al. (1998) orientieren sich bei der Definition der Flexibilitätsbereiche am Produktlebenszyklus und definieren für die Anlaufphase die Stückzahlflexibilität, für die Sättigungsphase die Variantenflexibilität und für die Auslaufphase die Wiederverwendungsflexibilität als wesentliche Elemente.

Unter Berücksichtigung der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit sowie des zu entwickelnden Datenmodells wird eine Klassifizierung der Flexibilitätsbereiche hinsichtlich der zu produzierenden Produkte, der für die Herstellung notwendigen Ressourcen sowie der zugehörigen Produktionsprozesse vorgeschlagen (vgl. Abbildung 7). In Anlehnung an BROWNE et al. (1984) sowie SETHI & SETHI (1990) werden im Folgenden die wichtigsten Merkmale der Flexibilität in den drei zuvor genannten Bereichen im Detail erläutert.

Flexibilitätsbereiche			
	Produkt	Ressource	Prozess
			
Flexibilitätsmerkmale	Auftragsflexibilität	Betriebsmittelflexibilität	<b>Arbeitsplanflexibilität*</b>
	<b>Produktflexibilität*</b>	Produktionsflexibilität	<b>Durchlaufflexibilität*</b>
	Produktionsmengenflexibilität	-	Erweiterungsflexibilität

\* Relevant für die vorliegende Arbeit

Abbildung 7: Flexibilitätsbereiche Produkt, Ressource und Prozess mit den zugehörigen Flexibilitätsmerkmalen

Die zunehmende Anzahl an Produktvarianten, bei gleichzeitig abnehmenden Losgrößen und kürzeren Produktlebenszyklen, führt zu einer häufigen Umstellung der Produktion. Diese Produktionsumstellungen resultieren aus einer zunehmenden Anzahl an Aufträgen bzw. der Einführung von neuen Produkten mit neuen Auftragsinhalten. Im Flexibilitätsbereich *Produkt* werden die produktbe-

zogenen Flexibilitätsmerkmale zusammengefasst. Die *Prozess-* bzw. *Auftragsflexibilität* beschreibt die Fähigkeit eines Produktionssystems, ein bestimmtes Produktspektrum ohne Umrüstaufwände herzustellen. Die schnelle und kostengünstige Einführung von neuen Produkttypen in bestehende Fertigungs- und Montagesysteme wird durch die *Produktflexibilität* beschrieben. Im Gegensatz zur Auftragsflexibilität wird jedoch davon ausgegangen, dass für die Integration von neuen Produkten in bestehende Fertigungs- und Montagesysteme Aufwände anfallen. Die *Produktionsmengenflexibilität* beschreibt die Fähigkeit, ein Fertigungs- und Montagesystem auch bei schwankenden Stückzahlen wirtschaftlich betreiben zu können. Dadurch wird ein Unternehmen zur geeigneten Reaktion auf Marktveränderungen und Absatzschwankungen befähigt. Die Auftrags- und die Produktionsmengenflexibilität werden durch das zu entwickelnde System zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen nicht beeinflusst und daher nicht weiter betrachtet. Das Datenmodell für adaptive Produktionssysteme soll eine Verbesserung der Produktflexibilität unterstützen.

Für die Herstellung eines breiten Produktspektrums werden hochintegrierte, flexible Maschinen und Anlagen benötigt. Aufgrund der kürzeren Produktlebenszyklen müssen die Ressourcen daher nicht nur eine hohe Flexibilität bezüglich der unterschiedlichen Varianten, sondern auch in Bezug auf die Vielseitigkeit des Einsatzes bei veränderten Produktionsprozessen aufweisen. Diese Anforderungen an die Flexibilität werden unter dem Flexibilitätsbereich *Ressource* zusammengefasst. Die *Betriebsmittelflexibilität* beschreibt die Fähigkeit einer Ressource, wechselnde Fertigungs- und Montageaufgaben auszuführen. Unter dem Begriff *Betriebsmittel* werden nach der VDI-RICHTLINIE 2815 (1978) sämtliche Anlagen, Geräte und Einrichtungen verstanden, die für die betriebliche Leistungserstellung notwendig sind. Die Flexibilität wird insbesondere durch den Aufwand für die Umstellung von einem Produktspektrum auf ein anderes bestimmt und kann z. B. durch die Zeiten für den Werkzeugwechsel, den Austausch von Vorrichtungen oder die Bereitstellung von Bearbeitungsprogrammen angegeben werden. Die *Produktionsflexibilität* beschreibt die Gesamtheit aller Produkttypen, die durch die bestehenden Produktionsanlagen hergestellt werden können. Durch eine hohe Produktionsflexibilität können umfangreiche Produktänderungen und neue Produkte aufwandsarm und schnell an den bestehenden Produktionsanlagen umgesetzt werden. Der Flexibilitätsbereich *Ressource* wird insbesondere durch die Gestaltung und Auslegung der Maschinen und Anlagen sowie der verwendeten Fertigungstechnologien beeinflusst. Diese Merkmale können durch den Einsatz des zu entwickelnden Systems nicht beeinflusst werden. Sie werden daher im Folgenden nicht weiter betrachtet.

Die zunehmende Individualisierung von Produkten führt zu einem höheren Anteil an kundenbezogenen Fertigungs- und Montageprozessen, welcher wiederum in einem erheblichen Mehraufwand bei der Steuerung von Produktionsprozessen resultiert. Die im Bereich der Produktionsdurchführung notwendigen Flexibilitätsmerkmale werden unter dem Flexibilitätsbereich *Prozess* zusammengefasst. Die *Arbeitsplanflexibilität* bezieht sich auf die Möglichkeit, die Arbeitsvorgänge in einem Fertigungsauftrag nach mehreren, technologisch möglichen Vorgangfolgen durchführen zu können. Durch diesen zusätzlichen Freiheitsgrad können aktuelle Zustände im Produktionssystem (z. B. Maschinenausfall, Kapazitätsauslastung) berücksichtigt werden. Mit Hilfe der *Durchlaufflexibilität* wird die Fähigkeit eines Systems angegeben, den Herstellungsprozess nach Ressourcenausfällen durch redundante Fertigungs- und Montageanlagen oder alternative Vorgangfolgen fortsetzen zu können. Die Möglichkeit zur einfachen, modularen Erweiterung einer Anlage hinsichtlich der Kapazität und der Fähigkeiten wird durch die *Erweiterungsflexibilität* beschrieben. Die Erweiterungsflexibilität ist für die mittel- und langfristigen Planungen in Produktionsumgebungen relevant und für die Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen nicht von Bedeutung. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden insbesondere die prozessbezogenen Aspekte der Arbeitsplan- und Durchlaufflexibilität detailliert betrachtet. Der Aspekt der Erweiterungsflexibilität wird nur insofern berücksichtigt, als dass mit Hilfe des Datenmodells eine aufwandsarme Eingliederung von zusätzlichen Maschinen und Anlagen in das zu entwickelnde System unterstützt wird.

## 2.4 Planung und Steuerung von Produktionsabläufen

### 2.4.1 Allgemeines

Die Planungsvorgaben der Konstruktion und der Arbeitsvorbereitung werden in der Fertigung und Montage in die vom Markt bzw. Kunden gewünschten Endprodukte umgewandelt (EVERSHEIM 1989). In diesem Zusammenhang stellen Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ein wesentliches Element zur Beherrschung der Auftragsabwicklung dar (WIENDAHL 2010). Die PPS bildet somit den Kern eines jeden Industrieunternehmens (SCHUH & GIERTH 2006b), der neben den volatilen Rahmenbedingungen des Marktumfeldes auch den divergierenden logistischen und wirtschaftlichen Zielsetzungen unterliegt. Aus diesem Grund existiert keine geschlossene Lösung für die Problemstellung, sondern aufeinander aufbauende Teilaufgaben (WIENDAHL 1996b). Zur Abgrenzung der Begriffe *Produktionsplanung* und *Produktionssteuerung* werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Definitionen des VDI verwendet (1992, S. 167):

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

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

Das Einsatzgebiet der Produktionsplanung und -steuerung umfasst alle Fertigungsverfahren, die sich gemäß DIN 8580 in sechs Hauptgruppen gliedern. Neben den urformenden, umformenden und trennenden Verfahren beinhalten sie auch das Fügen, Beschichten und das Ändern von Stoffeigenschaften (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003b). Auf Basis der genannten DIN-Norm ist neben den mechanischen Fertigungsverfahren auch das Fügen, welches der wesentliche Vorgang der Montage ist, Teil der Fertigung. Diesem Verständnis folgend, werden die Begriffe *Fertigung* und *Produktion* im weiteren Verlauf der Arbeit synonym verwendet.

### 2.4.2 Logistische Zielgrößen der Produktionsplanung und -steuerung

#### 2.4.2.1 Übersicht

Die Produktionsplanung und -steuerung hat die zentrale Aufgabe, die logistischen Zielgrößen unter Berücksichtigung der jeweiligen Abhängigkeiten sowie hinsichtlich einer hohen Effizienz und Wirtschaftlichkeit der Fertigung zu erreichen. Die Logistikleistung und die Logistikkosten bilden die Basis für das zugrundeliegende Zielsystem (vgl. Abbildung 8) (NYHUIS & SCHMIDT 2008). Die vom Markt wahrgenommene *Logistikleistung* umfasst die Faktoren *Liefertreue* und *Lieferzeit*. Eine hohe Liefertreue bedingt eine hohe Termintreue in der unternehmensinternen Auftragsabwicklung. Kurze Lieferzeiten erfordern wiederum kurze Durchlaufzeiten. Die unternehmensbezogenen *Logistikkosten* gliedern sich zum einen in *Kapitalbindungskosten* und zum anderen in *Prozesskosten* auf. Eine Senkung der Kapitalbindungskosten lässt sich nur durch eine Reduzierung des Bestandes an Rohmaterialien, Halbfabrikaten und Fertigwaren erreichen. Die Prozesskosten hängen maßgeblich von der Auslastung der eingesetzten Maschinen und Anlagen ab (WIENDAHL 2010).

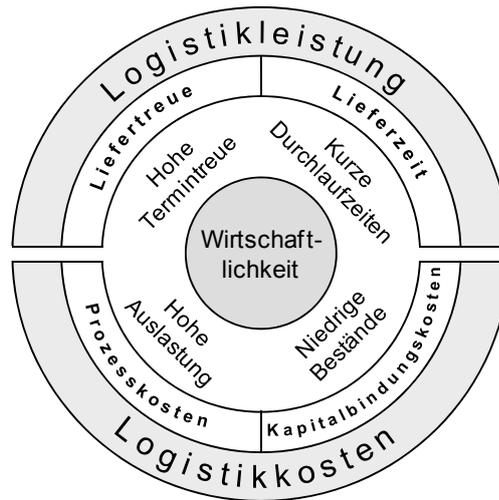


Abbildung 8: Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung (PPS) (in Anlehnung an WIENDAHL 2010)

Die divergierenden Interessen von Kunden und Unternehmen führen zu einem Zielkonflikt. Aus Kundensicht sollen Aufträge kurzfristig ausgeführt und zugesagte Liefertermine eingehalten werden. Unternehmen streben hingegen geringe Umlaufbestände und insbesondere eine hohe und gleichmäßige Auslastung der Produktionsressourcen an. Letztere lässt sich jedoch nur durch ein hohes Bestandsniveau sichern, welches wiederum in langen Durchlaufzeiten und einer geringen Liefertreue resultiert (WIENDAHL 2010). Die Gegenläufigkeit dieser Zielsetzungen wird als *Dilemma der Ablaufplanung* bezeichnet (GUTENBERG 1976) und legt nahe, dass einzelne Zielgrößen nicht isoliert betrachtet werden sollen. Die entscheidende Aufgabe der Produktionsplanung und -steuerung ist daher, die optimale Balance zwischen den beschriebenen logistischen Zielen herzustellen (NYHUIS & SCHMIDT 2008). Die Schwerpunktsetzung der logistischen Zielgrößen hängt vom Kundenentkopplungspunkt ab. Im kundenanonymen Teil (Lagerfertigung) stehen die unternehmensbezogenen Zielgrößen *Auslastung* und *Bestand* im Vordergrund. Im kundenbezogenen Bereich der Produktion (Auftragsfertigung) findet hingegen eine Verlagerung zu den marktbezogenen Zielen *Durchlaufzeit* und *Termintreue* statt (WIENDAHL 2010).

Aufgrund der hohen strategischen Bedeutung für den Unternehmenserfolg werden die vier logistischen Zielgrößen im Folgenden dargestellt. Diese bilden gleichzeitig die Basis für die Bewertung des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen.

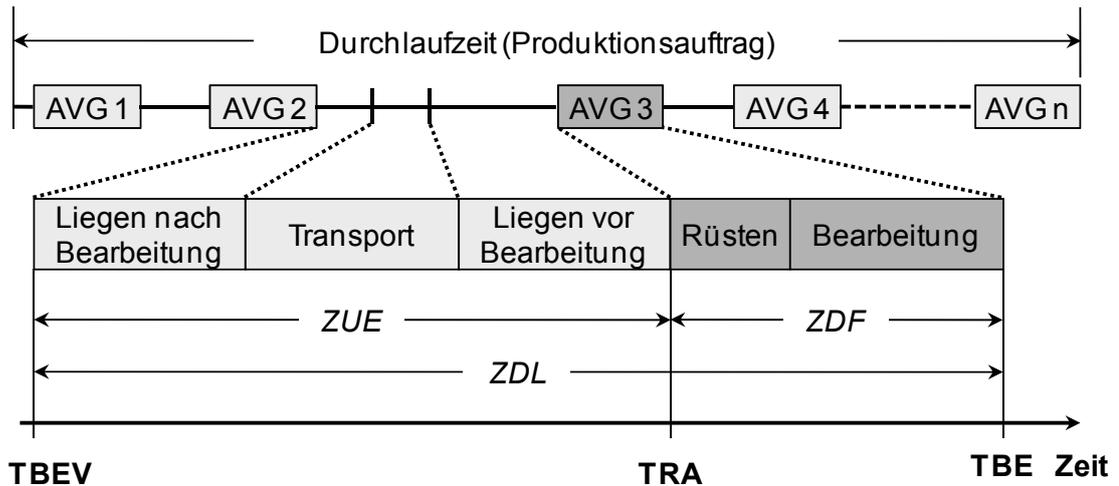
### 2.4.2.2 Bestand

Der Bestand in einem produzierenden Unternehmen kann in Lager- und Fertigungsbestand unterschieden werden. Der Lagerbestand setzt sich aus Rohmaterialien, Halbfabrikaten und Fertigteilen zusammen. Der Fertigungsbestand (Umlaufbestand) umfasst die freigegebenen, aber noch nicht fertiggestellten Aufträge in der Produktion. In der Produktionssteuerung wird der Umlaufbestand mit Hilfe der Vorgabezeit oder der Anzahl an Fertigungsaufträgen angegeben (LÖDDING 2008b). Im weiteren Verlauf der Arbeit wird nur der Umlaufbestand in der Fertigung betrachtet.

Ein hoher Umlaufbestand bewirkt eine hohe Auslastung von Maschinen und Anlagen, resultiert gleichzeitig jedoch in einer deutlichen Erhöhung der Durchlaufzeiten. Dies führt dazu, dass störanfällige Prozesse, nicht abgestimmte Kapazitäten, mangelnde Flexibilitäten, Ausschuss und eine unzureichende Termintreue verdeckt bleiben (WIENDAHL 2010). Durch die Beeinflussung der Auslastung, der Durchlaufzeit und der Termintreue wird der Bestand somit zur wichtigsten Regelgröße im Bereich der Planung und Steuerung von Produktionsabläufen (WIENDAHL 1997). Durch gezielte Maßnahmen im Bereich der Auftragsfreigabe und der Kapazitätssteuerung lässt sich der Bestand aktiv beeinflussen (NYHUIS 2008).

### 2.4.2.3 Durchlaufzeit

Die Zeitdauer zwischen der Freigabe eines Auftrages und dessen Bearbeitungsende entspricht der Durchlaufzeit eines Produktionsauftrages (LÖDDING 2008b). Sie setzt sich aus der Summe der Durchlaufzeiten (*ZDL*) der einzelnen Arbeitsvorgänge an den Fertigungs- und Montagestationen zusammen. Die arbeitsvorgangsbezogene Durchlaufzeit beginnt mit dem Bearbeitungsende an der vorherigen Arbeitsstation (beim ersten Arbeitsvorgang ist dies die Auftragsfreigabe) und schließt mit der Fertigstellung des Bearbeitungsvorganges am betrachteten Arbeitssystem. Die Durchlaufzeit eines Arbeitsvorganges lässt sich wiederum in die Übergangszeit (*ZUE*) und die Durchführungszeit (*ZDF*) unterteilen. Die Übergangszeit umfasst das Liegen nach der Bearbeitung, den Transport zur nachfolgenden Bearbeitungsstation und das Liegen vor der nächsten Bearbeitung. Der Aufwand für das Rüsten der Bearbeitungsstation und die Bearbeitung eines Auftrages an derselben werden in der Durchführungszeit zusammengefasst (vgl. Abbildung 9) (WIENDAHL 2008b).



**Legende:**

- |  |                         |
|--|-------------------------|
| AVG : Arbeitsvorgang                   | ZDL : Durchlaufzeit     |
| TBEV : Bearbeitungsende des Vorgängers | ZUE : Übergangszeit     |
| TRA : Rüstanfang                       | ZDF : Durchführungszeit |
| TBE : Bearbeitungsende                 |                         |

Abbildung 9: Auftrags- und arbeitsvorgangsbezogene Elemente der Durchlaufzeit (in Anlehnung an WIENDAHL 2010)

Die Anforderungen an die Produktionssteuerung bestehen im Wesentlichen darin, möglichst kurze Auftrags-Durchlaufzeiten zu erreichen. Diese bilden die Untergrenze für die Lieferzeit und sind nur mit einer geringen Anzahl an Aufträgen (Bestand) in der Fertigung realisierbar. Daraus resultiert jedoch eine geringe Auslastung der Produktionsanlagen (LÖDDING 2008b). Eine Möglichkeit zur Bewertung der Durchlaufzeit an einem Arbeitssystem oder in der gesamten Fertigung bietet der Flussgrad (*FG*). Dieser berechnet sich als Quotient aus der Durchlaufzeit und der Durchführungszeit und steigt mit zunehmenden Übergangszeiten an (WIENDAHL 1997):

$$FG = \frac{ZDL}{ZDF} \quad (1)$$

Die Durchführungszeit wird von der eingesetzten Fertigungstechnologie, den zugehörigen Ressourcen und der jeweiligen Losgröße pro Auftrag bestimmt. Die Liegezeit nach der Bearbeitung und der Transport sind von der Transportorganisation abhängig. Die Organisationsform der Fertigung und die Produktionssteuerung bestimmt im Wesentlichen die Liegezeit vor der Bearbeitung (WIENDAHL 2008b). Eine Beeinflussung der Durchführungszeit ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

### 2.4.2.4 Termintreue

Im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung sind die Auftragstermine die am häufigsten benutzten Steuerungsgrößen in der Produktion. Insbesondere vor dem Hintergrund einer stetigen Verringerung der Umlaufbestände sind vermehrt Strategien erforderlich, die eine termingerechte Auslieferung gewährleisten (z. B. Just-in-Time (JIT) und Just-in-Sequence (JIS)) (LÖDDING 2008b). Die Termintreue ist definiert als das Verhältnis der rechtzeitig fertiggestellten Aufträge zu der Gesamtzahl aller abgeschlossenen Aufträge in einem definierten Betrachtungszeitraum. Als Grundlage für die Bewertung dient eine festgelegte Termintoleranz, die sich am Plan-Fertigstellungstermin ausrichtet. Als termintreu gelten die Aufträge, deren Ist-Fertigstellungstermine innerhalb dieser Termintoleranz liegen (YU 2001). Die Terminabweichung eines einzelnen Auftrages ergibt sich aus der Abweichung des tatsächlichen Auftragsdurchlaufes vom geplanten Auftragsdurchlauf und kann anhand des Auftragszugangs in die Fertigung, des Auftragsabgangs oder der Auftrags-Durchlaufzeit gemessen werden (LÖDDING 2008b). In der Praxis werden jedoch normalerweise ausschließlich die Abgangstermine als Kenngröße verwendet (BEGEMANN 2005). Durch die direkte Auswirkung der Termintreue auf die Liefertreue gewinnt diese Zielgröße immer mehr an Bedeutung (LÖDDING 2008b). In Ergänzung zur Termintreue kann aus Marktsicht zusätzlich die Termineinhaltung definiert werden. Diese gibt an, ob ein Auftrag zum definierten Termin an den Kunden ausgeliefert werden konnte (YU 2001). Die dargestellten Zusammenhänge sind in Abbildung 10 verdeutlicht.

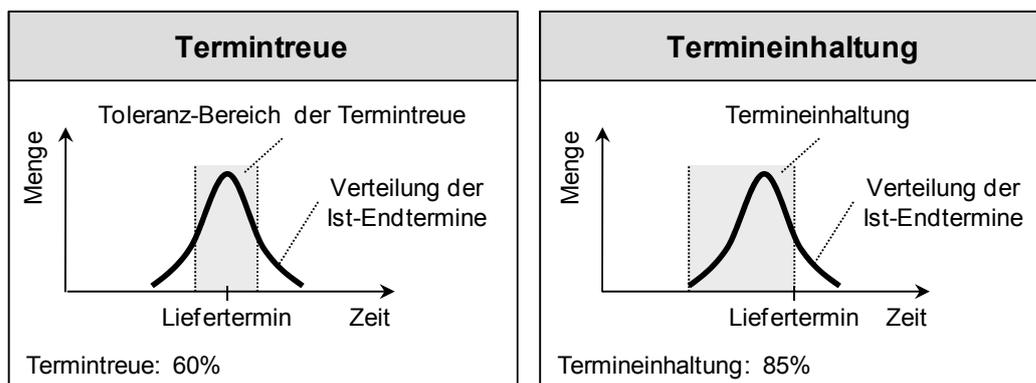


Abbildung 10: Termintreue und Termineinhaltung (in Anlehnung an YU 2001)

### 2.4.2.5 Auslastung

Die Auslastung beschreibt das Verhältnis der tatsächlichen und der maximal möglichen Leistung eines Arbeitssystems. Die Leistung eines Arbeitssystems, in der Praxis oft als Durchsatz oder Ausbringung bezeichnet, ergibt sich als Quoti-

ent von Arbeit und Zeit. Die maximal mögliche Arbeitsleistung ist über die verfügbare Arbeitssystemkapazität vorgegeben und wird entweder in Stunden pro Betriebskalendertag oder Aufträgen pro Betriebskalendertag gemessen. Mit einer steigenden Auslastung und der resultierenden Verteilung von Investitions- und Betriebskosten auf eine größere Anzahl an Aufträgen lassen sich die Herstellungskosten eines Einzelproduktes reduzieren. Eine hohe *Auslastung* wirkt sich allerdings gleichzeitig negativ auf die Zielgrößen *Durchlaufzeit* und *Bestand* aus, weshalb diese logistische Zielgröße an Bedeutung verliert (LÖDDING 2008b).

### 2.4.3 Grundlagen der Produktionsplanung

Auf Basis der Begriffsdefinitionen in Abschnitt 2.4.1 werden nachfolgend die wesentlichen Aufgaben der Produktionsplanung dargestellt. In diesem Zusammenhang wird das sogenannte Aachener PPS-Modell (SCHUH & GIERTH 2006b) genutzt, welches die relevanten Zusammenhänge der Produktionsplanung und -steuerung modellhaft beschreibt. Die in Abbildung 11 dargestellte Aufgabenreferenzsicht des Aachener PPS-Modells differenziert zwischen den überbetrieblichen Netzwerkaufgaben, den innerbetrieblichen Kernaufgaben sowie den Querschnittsaufgaben. Die *Netzwerkaufgaben* subsumieren sämtliche Aufgaben, die im Zusammenhang eines unternehmensübergreifenden, verteilten Wertschöpfungsprozesses auszuführen sind (SCHUH & ROESGEN 2006). Da sich die vorliegende Arbeit ausschließlich auf die innerbetrieblichen Aspekte der Auftragsabwicklung fokussiert, werden die Netzwerkaufgaben nicht weiter betrachtet. Die *Kernaufgaben* des Aachener PPS-Modells umfassen die ursprünglichen Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung aus Sicht des einzelnen Unternehmens (SCHUH & GIERTH 2006b). In diesem Zusammenhang werden nur die Aufgaben betrachtet, die eine direkte Wertschöpfung erbringen (SCHUH & ROESGEN 2006).

Mit einem mittel- bis langfristigen Zeithorizont bildet die *Produktionsprogrammplanung* den Ausgangspunkt der Produktionsplanung (MERTENS 1996). Für einen definierten Planungshorizont werden die herzustellenden Erzeugnisse nach Art, Menge und Termin periodisch in einer rollierenden Planung festgelegt. Je nach Produktionstyp greift die Produktionsprogrammplanung auf unterschiedliche Informationsgrundlagen zurück. Im Rahmen der Einzelteillfertigung erfolgt die Produktionsprogrammplanung ausschließlich auf Basis von realen Kundenaufträgen, wohingegen bei einer rein kundenanonymen Lagerfertigung prognostizierte Absatzerwartungen als Grundlage dienen. Das Ergebnis dieses Arbeitsschrittes ist ein Produktionsplan an verkaufsfähigen Artikeln (Primärbedarf) (SCHUH & ROESGEN 2006). Die Planzahlen bilden die Grundlage für einen ersten

Abgleich zwischen den benötigten Produktionsmengen und den tatsächlich verfügbaren Kapazitäten (MERTENS 1996).

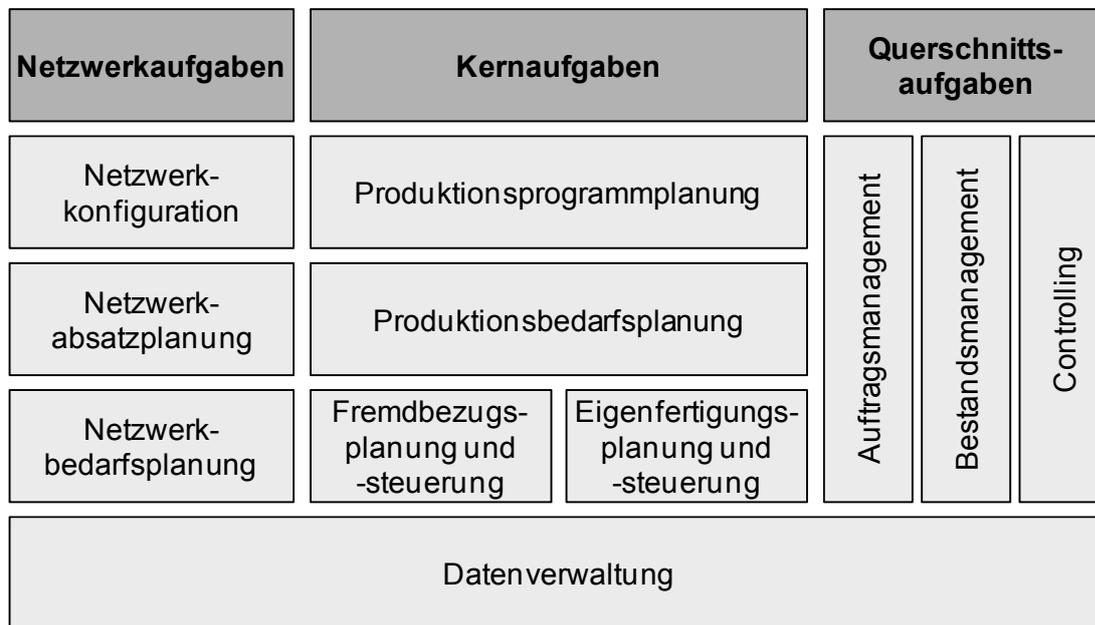


Abbildung 11: Hauptaufgaben der Produktionsplanung und -steuerung (Aachener PPS-Modell) (SCHUH & GIERTH 2006b)

Auf der Grundlage des Produktionsprogramms werden in der *Produktionsbedarfsplanung* die benötigten Materialien sowie die erforderlichen Ressourcenkapazitäten und Terminpläne abgeleitet (WIENDAHL 1996b). In der *Eigenfertigungsplanung und -steuerung* wird nach dem Aachener PPS-Modell die Losgrößenberechnung, die Feinterminierung und die Reihenfolgeplanung sowie die Verfügbarkeitsprüfung durchgeführt. Zu den Aufgaben der *Fremdbezugsplanung und -steuerung* gehören die Ermittlung von wirtschaftlichen Bestellmengen, die Einholung und Bewertung von Angeboten sowie die Auswahl von geeigneten Lieferanten (LÖDDING 2008b).

In Ergänzung zu den einzelnen Kernaufgaben stellen die *Querschnittsaufgaben* eine bereichsübergreifende Integration und Optimierung der Produktionsplanung und -steuerung sicher. Die drei Aufgaben umfassen die Koordination der Auftragsabwicklung über die verschiedenen Unternehmensbereiche (Auftragsmanagement), die Verwaltung und Bewertung von Beständen (Bestandsmanagement) sowie die Überwachung der logistischen Zielerreichung (Controlling). Eine wichtige Voraussetzung für die fehlerfreie Ausführung der Kern- und Querschnittsaufgaben ist der Zugriff auf die jeweils relevanten Daten. Die *Datenverwaltung* hat die Aufgabe, sämtliche Daten zu speichern, zu pflegen und in einer hohen Qualität zur Verfügung zu stellen (SCHUH & ROESGEN 2006).

Im Hinblick auf die Zielsetzung der Arbeit wurde auf das Thema der Produktionsplanung nur verhältnismäßig kurz eingegangen. An dieser Stelle sei daher auf weiterführende Literatur (HACKSTEIN 1984, MERTENS 1996, SCHUH 2006, LÖDDING 2008b, WIENDAHL 2010) verwiesen.

### 2.4.4 Grundlagen der Produktionssteuerung

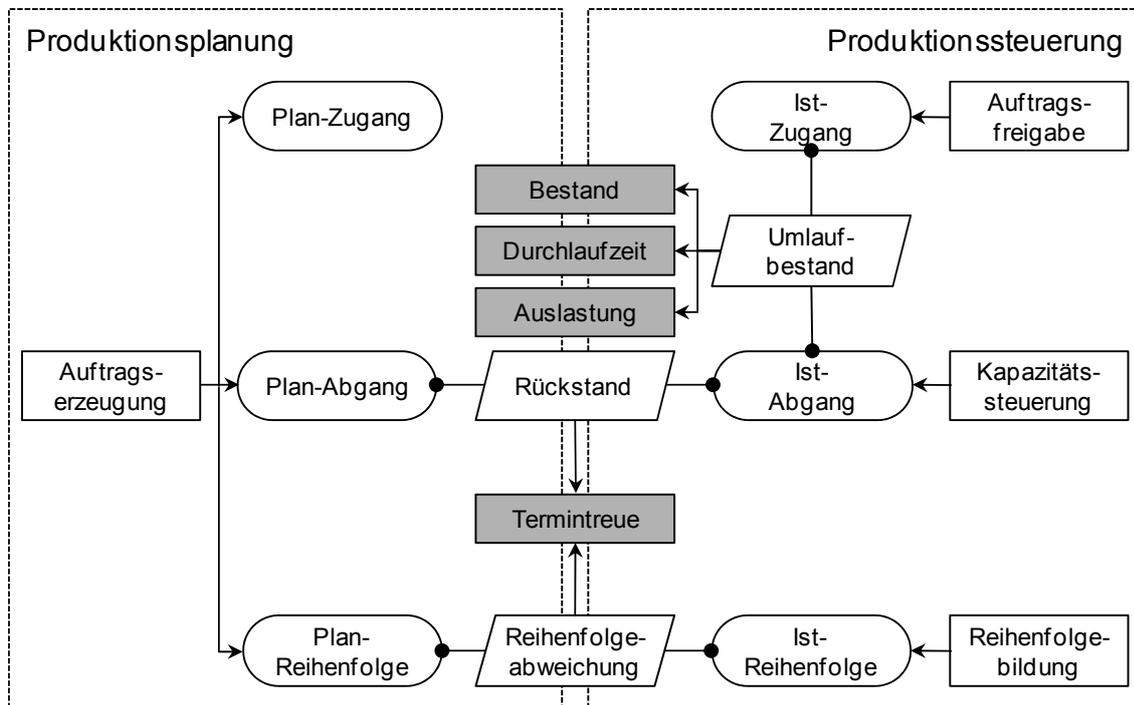
Während in der Produktionsplanung die Inhalte der Einzelprozesse spezifiziert werden, hat die Produktionssteuerung die Aufgabe, die Vorgaben und Ergebnisse der Produktionsplanung umzusetzen (SCHUH & ROESGEN 2006, LÖDDING 2008b). Die Produktionssteuerung stellt somit die Schnittstelle zwischen den planenden und ausführenden Bereichen eines Unternehmens dar (PRITSCHOW et al. 1996). Gleichzeitig leistet sie einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der logistischen Zielgrößen (NYHUIS ET AL. 2006). Das Modell zur Fertigungssteuerung von LÖDDING (2008b) (vgl. Abbildung 12) beschreibt die Aufgaben der Fertigungssteuerung und den Einfluss derselben auf die logistischen Zielgrößen.

Das Modell setzt sich aus den vier Grundelementen Stell-, Regel- und Zielgrößen sowie den Aufgaben der Produktionsplanung und -steuerung zusammen. Die einzelnen Elemente sind durch Wirkzusammenhänge miteinander verknüpft (LÖDDING 2008b):

- Die Aufgaben legen die Plan- und Ist-Stellgrößen fest.
- Die Regelgrößen resultieren aus der Differenz von zwei Stellgrößen.
- Die logistischen Zielgrößen (Bestand, Durchlaufzeit, Auslastung und Termintreue) werden aus den Regelgrößen abgeleitet.

Die *Auftragserzeugung* ist eine Aufgabe der Produktionsplanung, die bereits im Rahmen des Aachener-PPS-Modells (vgl. Abschnitt 2.4.3) beschrieben wurde. Die Produktionssteuerung, die auf Basis der vorangegangenen Planung agiert, setzt sich aus der Auftragsfreigabe, der Kapazitätssteuerung und der Reihenfolgebildung zusammen (LÖDDING 2008b). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus der Planungsphase werden im Rahmen der *Auftragsfreigabe* der Zeitpunkt und die Reihenfolge für die Fertigung der Aufträge festgelegt (SCHUH & ROESGEN 2006, LÖDDING 2008a). Hierfür können vorgesehene Verfahren, wie beispielsweise der Planstarttermin, der Bestand der Fertigung bzw. eines Arbeitssystems oder die Belastung der Arbeitssysteme, die für die Auftragsdurchführung benötigt werden, als Bewertungsgrundlage genommen werden (LÖDDING 2008b). Durch die Auftragsfreigabe wird die Stellgröße *Ist-Zugang* zur Fertigung

definiert, welche über die Regelgröße *Umlaufbestand* die logistischen Zielgrößen Bestand, Durchlaufzeit und Auslastung beeinflusst (LÖDDING 2008a).



**Legende:**

- |           |            |              |
|-----------|------------|--------------|
| Aufgabe   | Stellgröße | Regelgröße   |
| Zielgröße | Differenz  | Wirkrichtung |

Abbildung 12: Modell der Fertigungssteuerung (in Anlehnung an LÖDDING 2008b)

Mit Hilfe der *Kapazitätssteuerung* werden die tatsächlich eingesetzten Kapazitäten der Arbeitssysteme im Fertigungsbereich festgelegt (LÖDDING 2008a). Der Begriff *Kapazität* wird nach VDI-RICHTLINIE 2815 (1978) definiert als „Leistungsangebot von Menschen und/oder Leistungsvermögen von Betriebsmitteln für einen definierten Bereich innerhalb einer bestimmten Zeitspanne bzw. eines Zeitabschnittes“. Ein *Arbeitssystem* ist in diesem Zusammenhang die kleinste, selbstständig arbeitsfähige Einheit, in der jeweils ein einzelner Arbeitsvorgang ausgeführt werden kann (GÜNTHER & TEMPELMEIER 2009). Die Aufgabe der Kapazitätssteuerung ist es, die Verfügbarkeit von Maschinen und sonstigen Ressourcen, wie beispielsweise Personal, Material, Werkzeuge oder Vorrichtungen, sicherzustellen (WIENDAHL 2010). Die Kapazitätssteuerung beeinflusst somit maßgeblich den *Ist-Abgang* in der Fertigung (LÖDDING 2008b). Die Kapazitätssteuerung wirkt über die Regelgrößen *Umlaufbestand* und *Rückstand* als einzige der vier Aufgaben auf alle vier logistischen Zielgrößen (NYHUIS ET AL. 2006).

Die *Reihenfolgebildung* legt die Sequenz fest, in welcher die Aufträge an den einzelnen Arbeitssystemen bearbeitet werden (LÖDDING 2008b). In Abhängigkeit der logistischen Zielsetzung werden die wartenden Aufträge anhand definierter Kriterien priorisiert. Gängige Verfahren zur Definition der Reihenfolge sind u. a. der Zugangszeitpunkt der Aufträge, die Bearbeitungszeit, die Rüstzeit oder der Plan-Endtermin eines Auftrages (NYHUIS et al. 2006, LÖDDING 2008a). Über die Regelgröße *Reihenfolgeabweichung* kann die tatsächliche Reihenfolge die Termintreue eines Auftrages beeinflussen (LÖDDING 2008b). Bei geringen Beständen und wenigen wartenden Aufträgen an den Arbeitssystemen nimmt die Bedeutung der Reihenfolgebildung ab (YU 2001).

Neben den drei zuvor genannten Aufgaben der Fertigungssteuerung im Modell nach Lödding stellt die *Auftragsüberwachung* einen weiteren, wesentlichen Bestandteil der Produktionssteuerung dar (MERTENS 1996). Sie hat die Aufgabe, den Auftragsabwicklungsprozess in der Fertigung zu überwachen, Störungen zu identifizieren und bei Bedarf entsprechende Gegenmaßnahmen einzuleiten. Die Fortschrittsüberwachung basiert auf einem periodischen Soll-/Ist-Abgleich von Auftragsterminen oder gefertigten Mengen. Im Fall einer erheblichen Abweichung werden durch die Produktionssteuerung entsprechende Gegenmaßnahmen in Form einer veränderten Kapazitätsplanung oder einer wiederholten Feinplanung eingeleitet. Ergänzend hierzu können die Fertigungsressourcen mit den zugehörigen Werkzeugen und Vorrichtungen überwacht werden (SCHUH & ROESGEN 2006). Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit stellt die Auftragsüberwachung einen essentiellen Bestandteil dar. In diesem Zusammenhang müssen die relevanten Daten und Informationen in der Werkstattebene aufgenommen und in entsprechend aufbereiteter Form für das weitere Vorgehen den Entscheidungsträgern rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden (Jünemann & Beyer 1998). Die Informationslogistik in der Produktion, welche die Aufgaben der Planung, Steuerung und Überwachung des Informationsflusses subsumiert (KRÄMER 2002), ist daher ein Erfolgsfaktor für die Fertigungssteuerung und wird im folgenden Abschnitt detailliert betrachtet.

## 2.5 Informationslogistik in der Produktion

### 2.5.1 Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden die Begriffe *Daten*, *Informationen*, *Wissen*, *Informationsfluss* und *Informationsmanagement* im Hinblick auf die weitere Verwendung im Rahmen der vorliegenden Arbeit definiert und voneinander abgegrenzt.

In der zurückgezogenen DIN-Norm 44300 werden *Daten* als Gebilde aus „*Zeichen oder kontinuierliche Funktionen, die zum Zweck der Verarbeitung Information aufgrund bekannter oder unterstellter Abmachungen darstellen*“ definiert (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1972). Daten besitzen demnach eine objektive, quantitative Dimension (HILDEBRAND 2001), tragen allerdings nicht zur Wertschöpfung bei. Sie werden nach MERTENS et al. (2005) als eine Folge maschinell verarbeitbarer Zeichen verstanden und bilden die Grundlage und Quelle von Informationen und Wissen (DIPPOLD et al. 2005). Steuerungssignale in Steuerungssystemen, welche für den Betrieb von Arbeits- oder Materialflusssystemen verantwortlich sind, werden auch den Daten zugerechnet (Jünemann & Beyer 1998).

Mit Hilfe einer wissensgesteuerten Datenverdichtung bzw. -verarbeitung in einem Informationssystem erfolgt die Formulierung einer *Information* (JÜNEMANN & BEYER 1998, DIPPOLD et al. 2005). Durch den Kontextbezug besitzen Informationen eine subjektive, qualitative Dimension (HILDEBRAND 2001) und sind zweckbezogenes Wissen zur Vorbereitung und Durchführung von Handlungen (WITTMANN 1959, STICKEL 2001). Voraussetzung hierfür ist, dass die Daten vom Empfänger in ihrer formalen Bedeutung (Semantik) verstanden und als relevant erachtet werden (KLUBMANN 2009). Im Rahmen der DIN 44300 wird der Begriff *Information* als „*Kenntnis über Sachverhalte und Vorgänge*“ definiert (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1972). Im produktionstechnischen Bereich wird der Begriff *Information* durch HEIDERICH (2001, S. 4) wie folgt festgelegt: „*Informationen sind zweckorientierte Nachrichten über den Zustand von betrieblichen Systemen bzw. den Verlauf betrieblicher Prozesse in Vergangenheit, Gegenwart oder Zukunft. Informationen sind in der Regel mit einer Funktion zur Planung und Steuerung eines Systems verbunden*“.

Unter dem Begriff *Wissen* wird die „*Gesamtheit aller Kenntnisse und Fähigkeiten auf einem bestimmten Gebiet*“ verstanden (STICKEL 2001, S. 2). Auf Basis von Daten und Informationen sowie unter Berücksichtigung von spezifischen Kontextbedingungen, die beispielsweise durch Regeln, Theorien, Modelle und Problemlösungstechniken (z. B. Algorithmen, Heuristiken) gegeben sind, wird eine effiziente, zweckgebundene Verwendung von Informationen ermöglicht (BIENIEK 2001, STICKEL 2001). Die resultierende Vernetzung von verschiedenen Informationen erlaubt die Lösung von komplexen Problemstellungen und die Generierung von neuem Wissen mit Hilfe der neu gewonnenen Informationen (BIENIEK 2001, DIPPOLD et al. 2005). Informationen bilden demnach die Voraussetzung, um an Wissen zu gelangen und dieses kontinuierlich zu erweitern (SCHÖNSLEBEN 2001). In Abbildung 13 wird der Zusammenhang zwischen Da-

ten, Informationen und Wissen zusammenfassend mit einem Beispiel veranschaulicht.

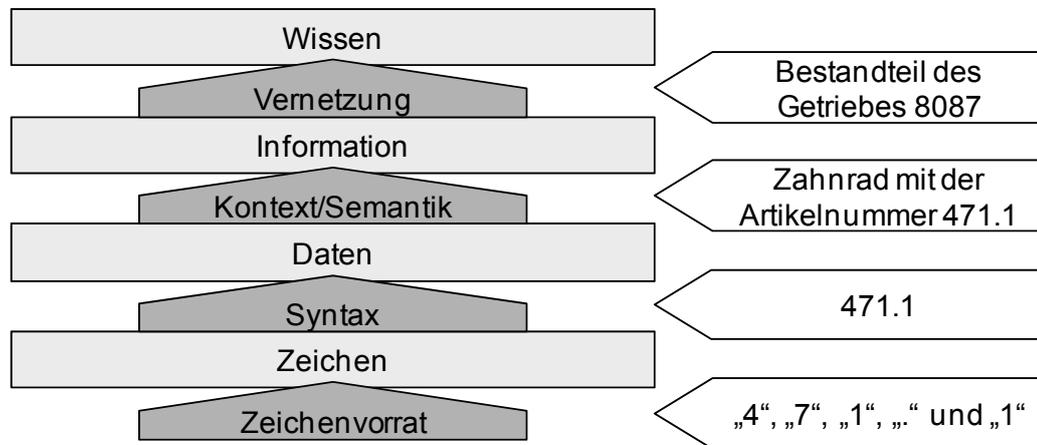


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Daten, Informationen und Wissen (in Anlehnung an REHÄUSER & KRCCMAR 1996)

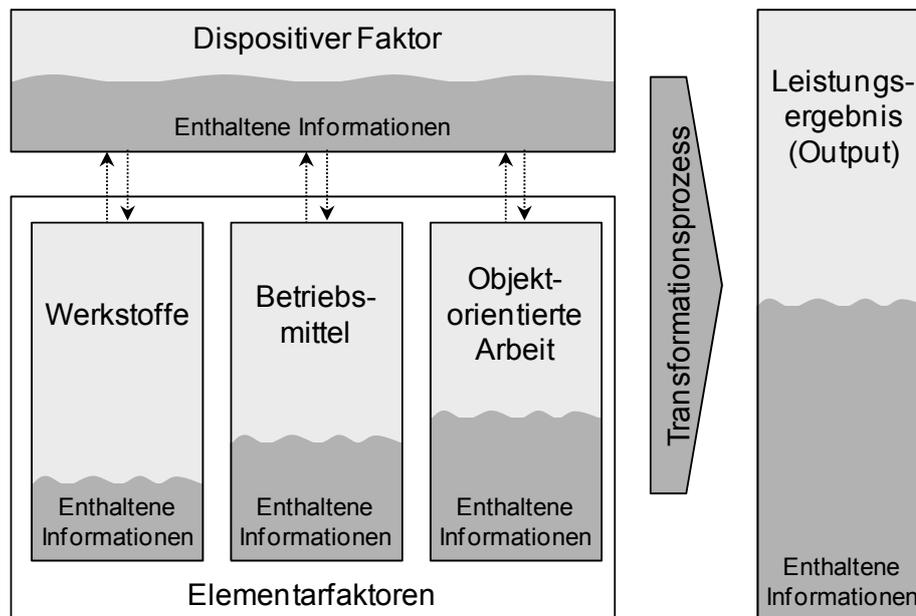
Die informationstechnische Bereitstellung sowie die Weitergabe und der Austausch von Daten werden als *Informationsfluss* bezeichnet, der sich aus den Phasen der Informationserzeugung, -übermittlung, -verarbeitung, -speicherung und -verwertung zusammensetzt (HEIDERICH 2001). In betrieblichen Umgebungen kann der Informationsfluss vom Materialfluss entkoppelt oder mit diesem synchronisiert sein (JÜNEMANN & BEYER 1998).

Das *Informationsmanagement* umfasst die Aufgaben der systematischen und methodengestützten Planung, Steuerung und Kontrolle des Einsatzes der Ressource *Information*. Für die Verarbeitung der Informationen werden zumeist computer-gestützte Informations- und Steuerungssysteme eingesetzt (JÜNEMANN & BEYER 1998, STICHEL 2001). Durch das zunehmende Informationsangebot, aber auch durch den gestiegenen Informationsbedarf von betrieblichen Abläufen und Prozessen, hat die Relevanz des Informationsmanagements in den letzten Jahren stark zugenommen (BIETHAHN et al. 2004).

### 2.5.2 Bedeutung für die Produktionsplanung und -steuerung

Eine wesentliche Voraussetzung zur Optimierung der logistischen Zielgrößen (vgl. Abschnitt 2.4.2) und zur Erreichung der geforderten Flexibilitätsmerkmale (vgl. Abschnitt 2.3) ist ein gut ausgeprägtes Informationsmanagement (SETHI & SETHI 1990, KURBEL 2005). Dieses muss gewährleisten, dass die richtige Menge an Informationen zur richtigen Zeit, am richtigen Ort und in der richtigen Qualität zur Verfügung gestellt wird (JÜNEMANN & BEYER 1998). In diesem Zusammenhang werden Informationen als notwendiger Bestandteil für die effektive und

effiziente Transformation von Produktionsfaktoren in Güter gesehen (PILLER 2006). Im anerkannten Produktionsfaktorenschema nach Gutenberg werden Produkte durch den Einsatz der Elementarfaktoren *Werkstoffe*, *Betriebsmittel* sowie *objektbezogene Arbeit* und unter der Zuhilfenahme von *dispositiven Faktoren* hergestellt. Die dispositiven Faktoren sind für eine optimale Kombination der Elementarfaktoren von Bedeutung und werden durch die Elemente *Leitung*, *Planung*, *Organisation* und *Überwachung* gebildet (GUTENBERG 1976). Gutenberg hat in seinem Schema Informationen nicht als eigenständigen Faktor berücksichtigt, wobei diese nach PILLER (2006) allerdings den bedeutendsten Beitrag zur Funktion der dispositiven Faktoren leisten. Gleichzeitig sind die Elementarfaktoren mit Informationen verbunden, die für die Nutzung von Werkstoffen, Betriebsmitteln und objektbezogener Arbeit unabdingbar sind. PILLER (2006) hat aus diesem Grund den Faktor *Information* in das Produktionsfaktorenschema nach Gutenberg eingeordnet (Abbildung 14).



### Legende:

.....> Intra- und interorganisationale Kommunikation

Abbildung 14: Erweitertes Produktionsfaktorenschema unter Berücksichtigung von Informationen (in Anlehnung an PILLER 2006)

Aktuelle Daten und Informationen sind somit für die Planung, Durchführung und Überwachung von betrieblichen Vorgängen unerlässlich (JÜNEMANN & BEYER 1998, HEIDERICH 2001). Dies gilt insbesondere für den Bereich der Auftragsfertigung: „*Being truly customer focused is not possible if the organization is not, first, information intensive*“ (BLATTBERG & GLAZER 1994, S. 9). Schätzungen zufolge fließen mehr als die Hälfte der Wertschöpfungskosten in den Produkti-

onsfaktor *Information* (KLETTI 2006). Die kundenbezogene Wertschöpfung findet deshalb insbesondere auch auf der Informationsebene statt (REICHWALD & PILLER 2002). Nach PFOHL (2010) ist die Gewährleistung des mit dem Materialfluss im Zusammenhang stehenden Informationsflusses die eigentliche Funktion der Auftragsabwicklung. Die Bereitstellung relevanter Informationen und ein schneller Informationsfluss bilden so die Grundlage für die echtzeitnahe Identifizierung und Beseitigung von unvorhergesehenen sowie unerwünschten Ereignissen bzw. Zuständen (HEIDERICH 2001, KLETTI 2006) und für die Optimierung von Betriebsabläufen (JÜNEMANN & BEYER 1998).

Durch Informations- und Steuerungssysteme können relevante Informationen in aufbereiteter und verdichteter Form den Entscheidungsträgern im Produktionssystem zur Verfügung gestellt werden (JÜNEMANN & BEYER 1998). Neben den zunehmenden Informationsflüssen wird die Komplexität auch dadurch verstärkt, dass der gleiche Informationsfluss keinen einmaligen Charakter haben muss. Dies gilt insbesondere für den Bereich der auftragsbezogenen Produktion. Zusätzlich zur der Verwaltung einer hohen Anzahl an Produktvarianten kann es auch zu einer Adaption von Fertigungs- und Montageabläufen kommen, die durch Maschinenausfälle oder unzureichende Produktqualitäten verursacht werden (KLUBMANN 2009). Durch eine echtzeitnahe Überwachung von Produkten, Ressourcen und Fertigungsabläufen können die notwendigen Informationen über moderne Informations- und Kommunikationstechnologien oder über geeignete Systeme der Betriebs- und Maschinendatenerfassung (BDE/MDE) an die betrieblichen Planungs- und Informationssysteme zurückgemeldet werden (EVERSHEIM 1996, PILLER 2006). Die Aktualität und die Qualität der zurückgemeldeten Produktionsdaten stellen in diesem Zusammenhang eine wesentliche Voraussetzung für die Realisierung einer flexiblen und adaptiven Planung und Steuerung von Produktionsabläufen dar (HUANG ET AL. 2007, SCHUH ET AL. 2007).

## 2.6 Fazit

Der Ausgangspunkt des vorliegenden Kapitels war die dargelegte Problemstellung im Bereich der auftragsbezogenen Planung und Steuerung von Produktionsabläufen. Als Basis für die weitere Arbeit wurde zunächst grundlegend auf die verschiedenen Formen der Individualisierung und der Kundenintegration im Wertschöpfungsprozess eingegangen. Als eine bedeutende Voraussetzung für die effiziente Durchführung von Wertschöpfungsprozessen wurden die Flexibilität und die unterschiedlichen Ausprägungen derselben dargestellt und in den Kontext der vorliegenden Arbeit gesetzt. Darauf aufbauend wurden die Grundlagen

der Produktionsplanung und -steuerung mit den zugehörigen Aufgaben sowie den logistischen Zielgrößen detailliert. Abschließend wurde die Informationslogistik als ein essentieller Bestandteil für die flexible und adaptive Planung und Steuerung von Produktionsabläufen herausgearbeitet.

Die Relevanz der dargestellten Themen für den Bereich der auftragsbezogenen Produktion wird in Abbildung 15 noch einmal zusammenfasst. In Anlehnung an PICOT et al. (2003) werden ausgewählte produktionsrelevante Eigenschaften verschiedener Individualisierungskonzepte (vgl. Abschnitt 2.2) bewertet. Es zeigt sich, dass insbesondere die im Rahmen dieser Arbeit behandelte auftragsbezogene Fertigung durch eine hohe Planungsunsicherheit sowie einen hohen Informations-, Flexibilitäts- und Koordinationsbedarf gekennzeichnet ist.

Produktionstyp Merkmale	Auftragsbezogene Einzelfertigung (Make-to-Order)	Gemischte Serienfertigung (Assemble-to-Order)	Marktorientierte Massenfertigung (Make-to-Stock)
Planungsunsicherheit	hoch	mittel	niedrig
Informationsbedarf	hoch	mittel	niedrig
Flexibilitätsbedarf	hoch	mittel	niedrig
Abstimmungs-/ Koordinationsbedarf	hoch	mittel	niedrig

*Abbildung 15: Charakteristischen Eigenschaften ausgewählter Produktionstypen  
(in Anlehnung an PICOT et al. 2003)*

Aufbauend auf den Ausführungen in Kapitel 2 werden im Folgenden die Anforderungen an das System zur produktbasierten Steuerung definiert.

---

### 3 Anforderungen an das System zur produktbasierten Steuerung

Die marktbezogenen Turbulenzen und die daraus resultierende Dynamisierung der unternehmensbezogenen Prozesse führen zu erhöhten Anforderungen hinsichtlich der Flexibilisierung von produkt-, ressourcen- und prozessbezogenen Bereichen (vgl. Abschnitt 2.3 ab Seite 16). Diese Rahmenbedingungen gelten insbesondere für den Bereich der auftragsbezogenen Produktion. In diesem Fall ist der Kundenbezug mit der einhergehenden großen Anzahl an Produktvarianten und einer hohen Materialflusskomplexität um ein Vielfaches höher als bei der vornehmlich kundenneutralen Serien- und Massenfertigung. Um eine hohe Termin- und Liefertreue sicherzustellen, ist eine individuelle Planung und Durchführung von Produktionsaufträgen erforderlich. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll dieser Notwendigkeit dadurch Rechnung getragen werden, dass das individuelle Werkstück, auf dem produkt- und prozessspezifische Daten hinterlegt sind, als zusätzliches Element zur Steuerung der Produktion eingesetzt wird.

Im Folgenden werden die wesentlichen Anforderungen an das System zur produktbasierten Steuerung definiert. Diese ergeben sich zum einen aus der in Kapitel 1 beschriebenen Ausgangssituation und Problemstellung einer auftragsbezogenen Produktion, die nach dem Verrichtungsprinzip organisiert ist. Zum anderen erfordert die vom Markt wahrgenommene Logistikleistung kurze Durchlaufzeiten und eine hohe Termintreue. Dies bedingt kurze Reaktionszeiten für die Identifikation von unvorhergesehenen Ereignissen, wie beispielsweise kurzfristigen Bestelländerungen, Maschinenstörungen oder unzureichenden Produktqualitäten, und die resultierende Anpassung von Arbeitsvorgängen bzw. Produktionsabläufen. Voraussetzung hierfür ist eine größtmögliche Transparenz der Fertigung. Die Anforderungen an das zu entwickelnde System sind in Abbildung 16 zusammengefasst und werden im Weiteren detailliert.

#### **Flexibilität**

Wie bereits in Abschnitt 2.3 (ab Seite 16) erläutert, muss das System zur produktbasierten Steuerung den Flexibilitätsbereichen *Produkt* und *Prozess* gerecht werden. Darunter wird insbesondere die Fähigkeit verstanden, eine hohe Anzahl von Produktvarianten bei gleichzeitig kleinen Losgrößen erfolgreich koordinieren und herstellen zu können (*Produktflexibilität*). Ergänzend hierzu soll die *Durchlaufflexibilität* die Möglichkeit der anforderungsgerechten Zuordnung von einzelnen Arbeitsvorgängen zu Ressourcen mit den entsprechenden Fähigkeiten gewährleisten. Durch eine hohe *Arbeitsplanflexibilität* sollen zusätzlich unter-

schiedliche, technisch mögliche Arbeitsvorgangsfolgen im Arbeitsplan abgebildet werden können. Die beiden letztgenannten Aspekte sollen v. a. eine hohe Systemrobustheit und eine aufwandsarme Adaption von Produktionsabläufen bei unvorhergesehenen Ereignissen (z. B. Maschinenausfall) sicherstellen. Neben der flexiblen Durchführung von Arbeitsvorgängen soll eine modulare Gestaltung des Arbeitsplans eine flexible Anpassung bzw. Modifizierung des Produktionsablaufes ermöglichen (z. B. Nacharbeit, Änderung Produktkonfiguration).

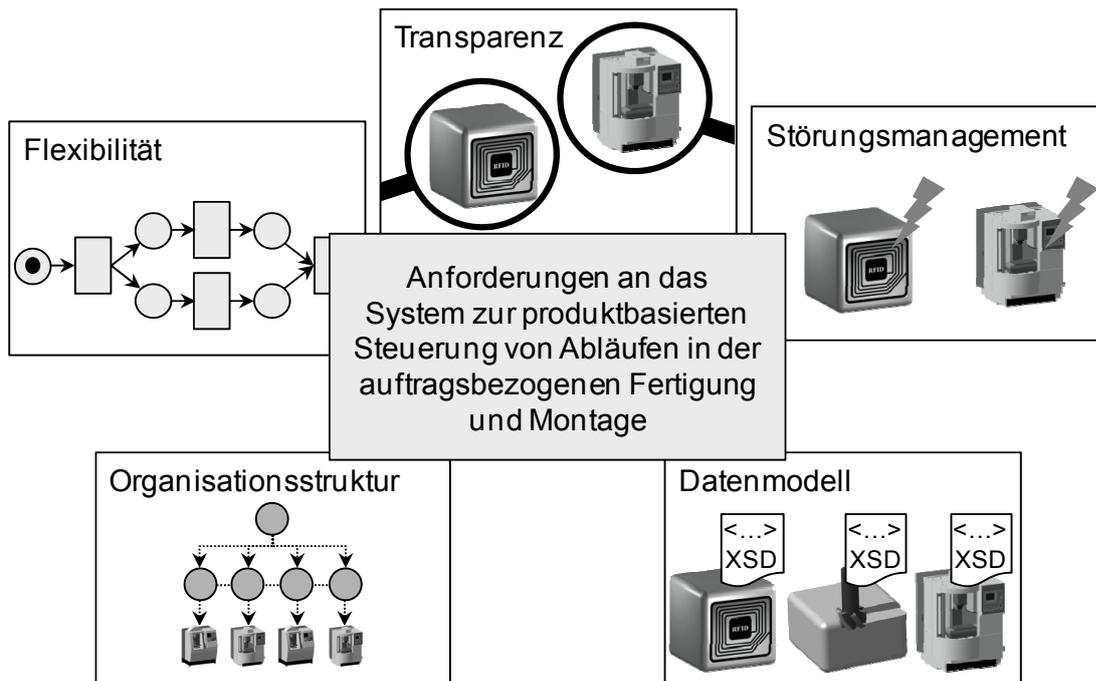


Abbildung 16: Anforderungen an das System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage

#### Transparenz

Das System zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen hat insbesondere die Aufgabe, die Einhaltung der definierten logistischen Zielgrößen sicherzustellen. Aufgrund des hohen Kundenbezugs und fehlender Bevorratungsstrategien in der auftragsbezogenen Produktion besteht keine Möglichkeit, Bedarfsschwankungen oder Störungen über Bestände zu kompensieren. Eine hohe Termintreue ist daher nur durch eine adäquate Auftragsfreigabe, kurze Durchlaufzeiten, durchführbare Arbeitspläne und eine ausreichende Transparenz der Elemente *Produkt*, *Ressource* und *Prozess* zu realisieren.

Um eine Steuerung von Produktionsabläufen in Abhängigkeit des Produktzustandes durchführen zu können, kommt dem aktuellen Wissen über das Erzeugnis eine große Bedeutung zu. Dies beinhaltet zum einen die durchgängige, echtzeitnahe Verfolgung und Rückverfolgung (Tracking & Tracing) eines Kunden-

---

auftrages bzw. Produktes durch die Fertigung. Zum anderen umfasst es die Berücksichtigung von aktuellen, produktspezifischen Informationen (z. B. Qualitätsdaten, geometriebezogene Informationen) bei der Ausführung von Arbeitsvorgängen. Mögliche Abweichungen gegenüber den ursprünglichen Planungen bzw. Annahmen können somit frühzeitig identifiziert und im nachfolgenden Produktionsablauf berücksichtigt werden.

Die Auswahl einer geeigneten Technologie ist eine wesentliche technische Voraussetzung für die echtzeitnahe Verfolgung und den prozesssicheren Zugriff auf dezentrale Datenelemente im Produktionsablauf. Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien bieten eine vielversprechende Möglichkeit, die Transparenz im Bereich der Produktionssteuerung zu verbessern. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit stellt die Nutzung anerkannter Technologien eine Prämisse zur Sicherstellung einer späteren, kostengünstigen Umsetzung in der industriellen Anwendung dar.

Um eine zustandsbezogene Belegung von Ressourcen zu erreichen, müssen aktuelle Informationen über die Verfügbarkeit und die Kapazitätsbelastung vorhanden sein. In diesem Zusammenhang sind mögliche Auswirkungen von Planänderungen oder Störungen (z. B. zusätzlicher Fertigungsauftrag, Verzögerungen im Fertigungsablauf), die zu einer veränderten Kapazitätsbelastung führen, einzubeziehen.

### **Störungsmanagement**

Die frühzeitige Identifizierung von unvorhergesehenen Ereignissen soll durch eine hohe Transparenz in Bezug auf die Elemente *Produkt*, *Ressource* und *Prozess* gewährleistet werden. Daraus ergibt sich die Anforderung, dass das System zur produktbasierten Steuerung bei der Auftragsdurchführung sowohl den aktuellen Fabrikkontext (z. B. Verfügbarkeit von Ressourcen) als auch den gegenwärtigen Status bzw. Zustand von Produkten berücksichtigt. Beim Auftreten von Prognosefehlern oder unvorhergesehenen Ereignissen sind durch effiziente Mechanismen eine kurzfristige Behebung der Störungsursachen und eine Minimierung der Störungsauswirkungen sicherzustellen.

Für eine produktzustandsbezogene Steuerung muss das System dazu befähigt werden, spezifische Merkmale eines Werkstückes zu beurteilen. Im Fall einer unzureichenden Erzeugnisqualität (z. B. Maßfehler) sollen mögliche Handlungsmaßnahmen (z. B. Nacharbeit, Ausschuss) abgeleitet werden. Der nachfolgende Wertschöpfungsprozess ist entsprechend zu adaptieren. Die technische Erfassung von relevanten Merkmalsausprägungen am Produkt (z. B. Oberflächenrauheit) mit Hilfe von geeigneten Sensorelementen ist nicht Bestandteil die-

ser Arbeit. Für die entsprechende Erkennung von Produktfehlern wird auf anerkannte Forschungsarbeiten verwiesen (z. B. REINHART & TEKOUO 2009).

Nach der Identifizierung von ressourcenbezogenen Störungen ist zu prüfen, ob eine entsprechende Änderung von Maschinenbelegungsplänen durch eine Umlagerung von Fertigungsaufträgen möglich ist. Unter Berücksichtigung von vorgegebenen Freiheitsgraden (z. B. alternative Ressourcen, Bearbeitungsreihenfolge) im produktspezifischen Arbeitsplan ist der Fertigungsablauf entsprechend anzupassen. Dies beinhaltet die entsprechende Reservierung von neuen Ressourcen und die resultierende Adaption der Kapazitätsbelastungen der nachfolgenden Arbeitsstationen. Eine Identifizierung von ressourcenbezogenen Störungsursachen und die anschließende Ableitung von Handlungsmaßnahmen zu deren Behebung ist nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit.

#### **Datenmodell**

Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung der zuvor genannten Anforderungen und der resultierenden Datenverarbeitungsvorgänge ist die Verwaltung, Strukturierung und Bereitstellung der hierfür notwendigen Daten. In diesem Zusammenhang sind zum einen die zur Verfügung stehenden Ressourcen mit den zugehörigen Fähigkeiten in einer geeigneten Weise abzubilden. Zum anderen ist ein formaler Beschreibungsstandard für die Darstellung von Fertigungsabläufen zu definieren, bei dem die folgenden Aspekte einbezogen werden sollen:

- Berücksichtigung von organisatorischen, arbeitsvorgangsbezogenen und produktspezifischen Informationen
- Abbildung von strukturellen Freiheitsgraden im Arbeitsplan
- Ressourcenneutrale und modulare Beschreibung von Arbeitsplänen
- Kontext- und anwendungsunabhängige Verwendbarkeit

Um eine zustandsgetriebene Steuerung von Werkstücken durch die Fertigung und Montage zu ermöglichen, sind neben den organisatorischen und arbeitsvorgangsbezogenen Informationen auch erzeugnisspezifische Daten (z. B. Abmessungen, Oberflächenrauheit) in der Ablaufbeschreibung zu hinterlegen. In Ergänzung hierzu soll gemäß den Flexibilitätsanforderungen eine Durchlauf- und Arbeitsplanflexibilität erreicht werden. Zu diesem Zweck sind strukturelle Freiheitsgrade bei der Maschinenbelegung und in der Arbeitsvorgangsreihenfolge sowie in alternative Arbeitsvorgänge abzubilden. Aus dieser Anforderung resultiert die Notwendigkeit einer ressourcenneutralen und modularen Beschreibung von Arbeitsplänen. Neben der Darstellung von Freiheitsgraden soll hierdurch

---

eine Modifizierung des Produktionsablaufes durch die Integration von zusätzlichen Arbeitsvorgängen realisiert werden. Um eine aufwandsarme Einbindung in betriebliche Planungs- und Informationssysteme durchführen zu können, ist eine kontext- und anwendungsunabhängige Verwendbarkeit des Datenmodells zu gewährleisten. Darüber hinaus ist die flexible Erweiterbarkeit des Modells und seine Anpassbarkeit an neue Rahmenbedingungen bzw. Anforderungen sicherzustellen.

### **Organisationsstruktur**

Im Bereich der Kleinserien- und kundenindividuellen Fertigung unterliegen die Leistungsfähigkeit und Flexibilität von Produktionssystemen einer zunehmenden Abhängigkeit in Bezug auf eine ausreichende Verfügbarkeit von aktuellen, steuerungsrelevanten Informationen. Für die Gewährleistung einer fehlerrobusten, adaptiven Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen müssen diese Informationen den Entscheidungsprozessen in der richtigen Menge, zur richtigen Zeit, am richtigen Ort und in der richtigen Qualität zur Verfügung gestellt werden. In diesem Zusammenhang hat die Organisationsstruktur einen entscheidenden Einfluss auf die Effizienz von Produktionsabläufen. Für eine leistungsfähige Steuerung von Fertigungsabläufen müssen im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Verantwortungsbereiche und die Interaktion zwischen diesen definiert werden.

Bei der Auslegung der Organisationsstruktur ist insbesondere die Interaktion zwischen den lokalen Arbeitsstationen und dem individuellen Produkt sicherzustellen. In diesem Zusammenhang müssen die produkt- und prozessspezifischen Daten eines Werkstückes Anpassungen und Optimierungen im Produktionsablauf ermöglichen. Dadurch soll der Übergang von statischen zu dynamischen Arbeitsplänen in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Ressourcen, der entsprechenden Produktzustände und der zugehörigen Arbeitspläne erreicht werden. Die Feinplanung hat aus diesem Grund aktuelle produkt- und prozessspezifische Daten zu berücksichtigen und ist erst durchzuführen, nachdem ein Werkstück an einer Arbeitsstation eingetroffen ist. Dies erfordert lokale Entscheidungsfreiräume und eine hohe Planungsgeschwindigkeit. Die durchgängige Überwachung und Steuerung der definierten logistischen Zielgrößen (z. B. Termintreue) ist somit auf die lokalen Organisationseinheiten aufzuteilen. Auf Basis einer echtzeitnahen Bereitstellung relevanter Informationen über Produkte, Prozesse und Ressourcen soll auf Arbeitsstationsebene eine unabhängige Planung, Durchführung und Überwachung von Arbeitsvorgängen stattfinden. Durch die lokalen Entscheidungsfreiräume entsteht die Notwendigkeit einer hohen Transparenz in der Werkstattebene. Um Auswirkungen von Verzögerungen und Störungen auf das gesamte Produktionssystem zu minimieren, ist eine regelmäßige Synchronisation

der einzelnen Ressourcen in Bezug auf Verfügbarkeit und Kapazitätsbelastung durchzuführen.

Das zu entwickelnde System zur produktbasierten Steuerung fokussiert sich auf die adaptive Durchführung von Wertschöpfungsprozessen in Abhängigkeit des Fabrikkontextes (z. B. Verfügbarkeit von Ressourcen) und des Produktzustandes. In diesem Zusammenhang sollen keine neuen Steuerungsprinzipien entwickelt werden. Um eine möglichst breite Anwendbarkeit sicherzustellen, sollen dem System individuelle Planungsbibliotheken bereitgestellt werden. Aus diesen Bibliotheken können für den spezifischen Anwendungsfall entsprechende Steuerungsprinzipien ausgewählt werden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die vorgelagerten Bereiche der Arbeitsplanung, welche die Kundenanforderungen in technische Spezifikationen umwandelt und anschließend in Arbeitsplänen detailliert, ebenso wie die Auftragserzeugung, die Materialdisposition, die Beschaffung und die Lagerung nicht betrachtet. Als Eingangsgröße für das System zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen dient eine bereits erzeugte Liste zu fertigender Aufträge. Des Weiteren ist der Einsatzbereich des Systems auf innerbetriebliche Abläufe beschränkt und hat keinen Einfluss auf die überbetriebliche Steuerung der Wertschöpfungskette (Supply Chain).

Basierend auf den zuvor genannten Anforderungen werden im nachfolgenden Kapitel relevante Forschungsansätze diskutiert. Im Hinblick auf die Zielsetzung dieser Arbeit kann der Stand der Forschung und Technik in die drei folgenden Teilbereiche unterteilt werden:

- Adaptive Steuerung von Produktionsabläufen
- Verfahren zum autonomen Störungsmanagement
- Modellierung von Produktionsabläufen

Die vorgestellten Arbeiten werden hinsichtlich ihrer Relevanz für die vorliegende Arbeit beurteilt. Die Bewertung dient als Grundlage für die Ableitung des Handlungsbedarfes.

## **4 Stand der Forschung und Technik**

### **4.1 Übersicht**

Aus Basis der dargestellten Grundlagen in Kapitel 2 und der in Kapitel 3 definierten Anforderungen wird im Folgenden der Stand der Forschung und Technik diskutiert. Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit wird in Abschnitt 4.2 zuerst auf den Bereich der adaptiven Steuerung von Produktionsabläufen eingegangen. Da die Produktionssteuerung in einem engen Zusammenhang mit organisatorischen und strukturellen Fragestellungen steht (DOBBERSTEIN 1997), werden in Abschnitt 4.2.1 zunächst grundlegende Organisationsstrukturen von Steuerungssystemen diskutiert und im Hinblick auf ihren Einsatz in der auftragsbezogenen Produktion bewertet. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 4.2.2 die Bedeutung von Informations- und Kommunikationstechnologien herausgearbeitet und es werden relevante Forschungsarbeiten aus dem Gebiet der sensorgestützten Produktionssteuerung untersucht (vgl. Abschnitt 4.2.3). Die zunehmende Relevanz von Störungen und deren erfolgreiches Management mit Hilfe von wissensbasierten Systemen wird in Abschnitt 4.3 detailliert betrachtet. Die grundlegenden Ausführungen zum Störungsmanagement sowie zum Aufbau und zur Funktionsweise von wissensbasierten Systemen werden ergänzt durch die Vorstellung und Diskussion von ausgewählten Forschungsansätzen aus diesem Bereich. Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Realisierung der geforderten Flexibilität liegt in der effizienten Abbildung von produkt-, ressourcen- und prozessspezifischen Daten. In Abschnitt 4.4 werden ausgewählte Arbeiten zur formalen Beschreibung von Produkten und durchgängige Datenmodelle aus dem Bereich der Produktionsplanung und dem Produktionsbetrieb vorgestellt.

### **4.2 Adaptive Steuerung von Produktionsabläufen**

#### **4.2.1 Organisationsstrukturen von Steuerungssystemen**

Wie bereits in Kapitel 2 dargestellt, liefern Daten und Informationen einen essentiellen Beitrag für die Funktion der dispositiven Faktoren, die für die Planung, Steuerung und Überwachung von Produktionsabläufen verantwortlich sind. Nach der Aggregation und Verarbeitung der aufgenommen Daten müssen diese den Entscheidungsprozessen in der richtigen Menge, zur richtigen Zeit, am richtigen

Ort und in der richtigen Qualität zur Verfügung gestellt werden (JÜNEMANN & BEYER 1998). Eine unzureichende Datenqualität und insbesondere fehlende, falsche oder verzögerte Rückmeldedaten stellen jedoch einen wesentlichen Grund für das Nichterreichen von logistischen Zielgrößen dar (SCHUH & WESTKÄMPER 2006, WIENDAHL 2008a).

Die Struktur eines Steuerungssystems (Organisationsstruktur) und die zugehörigen Informationsflüsse haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Effizienz von Steuerungsverfahren und die zeitnahe Bereitstellung der notwendigen Informationen (JÜNEMANN & BEYER 1998). Damit werden zum einen die Entscheidungskompetenzen der verschiedenen Elemente eines Produktionssystems definiert. Zum anderen wird mit Hilfe von Informations- und Steuerungssystemen die Kommunikation zwischen den beteiligten Elementen realisiert. Unter Kommunikation wird „*der Austausch von Informationen zwischen organisatorischen Entscheidungseinheiten verstanden*“ (FRESE 2005, S. 239).

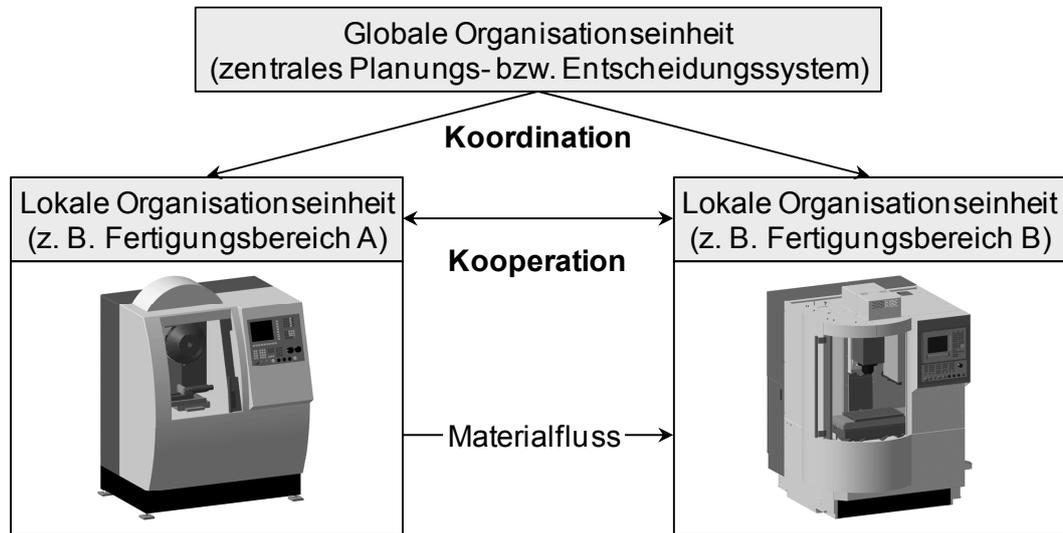
Der Austausch von Informationen kann entweder vertikal zwischen über- und untergeordneten Organisationseinheiten oder horizontal zwischen gleichberechtigten Einheiten erfolgen (FRESE 2005). In Abhängigkeit der Informationsflussrichtung wird in diesem Zusammenhang zwischen Koordination und Kooperation unterschieden (vgl. Abbildung 17) (DOBBERSTEIN 1997). Unter dem Begriff der *Koordination* wird „*die Abstimmung von Einzelaktivitäten im Hinblick auf ein übergeordnetes Gesamtziel*“ verstanden (VAHS 2007, S. 107). Dies umfasst den vertikalen Informationsaustausch zwischen über- und untergeordneten Einheiten, der aufgrund der vorliegenden Interdependenzen und Schnittstellen in arbeitsteiligen Systemen notwendig wird (VAHS 2007). Der Koordinationsbedarf zwischen den verschiedenen Elementen eines Produktionssystems ist nach SCHULTE-ZURHAUSEN (2005) abhängig von

- dem Grad der Arbeitsteilung,
- der Komplexität und Intensität der Beziehungen zwischen den Organisationseinheiten,
- den gegenseitigen Interdependenzen sowie
- den zu überwindenden Distanzen in räumlicher, zeitlicher und sachlicher Hinsicht.

Die horizontale Kommunikation zwischen gleichberechtigten Organisationseinheiten wird als *Kooperation* bezeichnet (DOBBERSTEIN 1997).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit repräsentiert eine übergeordnete, globale Organisationseinheit im produktionstechnischen Kontext ein zentrales Planungs-

bzw. Entscheidungssystem. Eine lokale Organisationseinheit kann beispielsweise einen Fertigungsbereich oder ein Arbeitssystem umfassen. Diese Einheit verfügt, je nach Organisationsstruktur, entweder über Planungsfunktionalitäten oder sie besitzt nur eine ausführende Funktion.

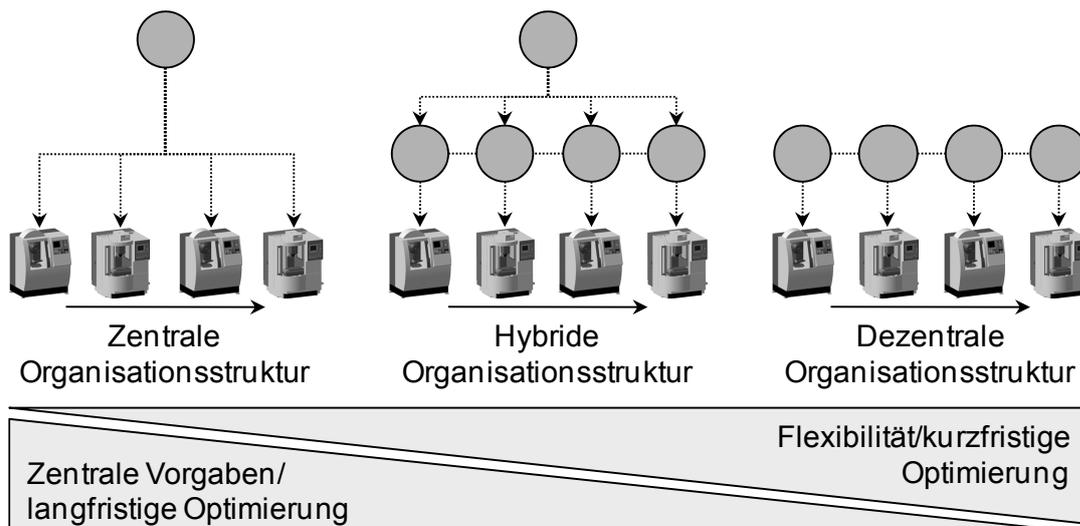


*Abbildung 17: Horizontale und vertikale Kommunikationsbeziehungen zwischen Organisationseinheiten (in Anlehnung an DOBBERSTEIN 1997)*

Die unterschiedlichen Formen der Kommunikation zwischen Organisationseinheiten stehen in einem engen Zusammenhang mit den Organisationsstrukturen. Diese beschreiben die Weisungs- und Kommunikationsverbindungen zwischen den vorhandenen Organisationseinheiten (KRÄKEL 2007) und haben somit einen wesentlichen Einfluss auf die Steuerung von Produktionsabläufen. ZÄPFEL (1998) hat in diesem Zusammenhang eine Differenzierung von Organisationsstrukturen hinsichtlich der Aufgabenverteilung zwischen den verschiedenen Organisationseinheiten in Produktionsumgebungen vorgenommen. In Anlehnung daran kann die Struktur von Steuerungssystemen in zentrale, dezentrale und hybride Grundformen unterteilt werden (vgl. Abbildung 18) (JÜNEMANN & BEYER 1998, BONGAERTS et al. 2000).

Bei der zentralen Organisationsstruktur führt die globale Organisationseinheit eine bereichsübergreifende detaillierte Planung (Grob- und Feinplanung) der Produktionskapazitäten sowie der Fertigungsaufträge nach Art, Menge und Terminen durch. Durch die zentrale Koordination können die Teilaufgaben der lokalen Organisationseinheiten zeitlich und inhaltlich aufeinander abgestimmt und nach zentral vorgegebenen Kriterien optimiert werden. Die einzelnen Produktionsbereiche stellen die erforderlichen Fertigungs- und Montageressourcen bereit und besitzen eine ausschließlich ausführende Funktion. Zwischen der globalen Organisationseinheit und den lokalen Organisationseinheiten besteht somit eine

Master-Slave-Beziehung. Beim Vorliegen von möglichen Abweichungen (z. B. Eilauftrag, Maschinenstörung) können die ausführenden Fertigungs- und Montagesysteme keine eigenständigen Umplanungen durchführen. In diesem Fall wird durch entsprechende Rückmeldungen von Ist-Daten aus der Produktion in die übergeordnete Hierarchieebene eine Anpassung durch das zentrale Entscheidungssystem für alle Produktionsbereiche vorgenommen. Aufgrund der großen Datenmengen und der daraus resultierenden, zeitintensiven Rechenoperationen lassen sich allerdings keine kurzfristigen Planänderungen in zentralistischen Systemen realisieren. Darüber hinaus führt der Ausfall des Zentralrechners zu einem Ausfall der entsprechenden Produktionsbereiche, die durch das betroffene System gesteuert werden. Die zentrale Organisationsstruktur bildet die Grundlage für das Paradigma der computerintegrierten Fertigung (CIM – Computer Integrated Manufacturing). Ihr Einsatz bietet sich insbesondere bei stabilen Umweltbedingungen, wie beispielsweise in der Großserienfertigung von Standarderzeugnissen, an. Das MRP-II-Konzept bildet ein typisches Beispiel für eine zentrale Organisationsstruktur (BULLINGER 1993, JÜNEMANN & BEYER 1998, ZÄPFEL 1998, BONGAERTS et al. 2000, WINDT 2008, TRENTESAUX 2009).



**Legende:**

-  Entscheidungssystem
-  Ausführendes Fertigungs- oder Montagesystem
-  Materialfluss
-  Informationsfluss

Abbildung 18: Grundformen von Organisationsstrukturen (in Anlehnung an BONGAERTS et al. 2000, TRENTESAUX 2009)

In dezentralen Organisationsstrukturen werden die Entscheidungskomplexe in Teilentscheidungen unterteilt und von mindestens zwei oder mehr Organisationseinheiten mit lokalen Planungsfunktionen bearbeitet. Durch die horizontale Auf-

teilung des Entscheidungsproblems (Segmentierung) sollen die Unabhängigkeit zwischen den Organisationseinheiten gestärkt und die Entscheidungskompetenzen (z. B. Maschinenbelegung, Störungsmanagement) in die Werkstattebene übertragen werden. Ein kennzeichnendes Merkmal von dezentralen Organisationsstrukturen ist die Bildung von kleinen, selbststeuernden Regelkreisen. Diese zeichnen sich insbesondere durch

- kurze Entscheidungswege,
- einen geringen Koordinationsaufwand,
- eine hohe Flexibilität,
- eine reduzierte Planungskomplexität im Vergleich zu zentralen Organisationsstrukturen und
- eine hohe Robustheit gegenüber Störungen aus.

Die einzelnen Organisationseinheiten sind durch ein Kommunikationssystem miteinander verbunden, über das eine Kooperation und eine gezielte Abstimmung der Produktionsabläufe stattfinden kann. Durch das Fehlen einer koordinierenden, globalen Organisationseinheit kann in dezentralen Organisationsstrukturen eine systemübergreifende Optimierung von Abläufen nur schwer erreicht werden. Dezentrale Organisationsstrukturen werden insbesondere im Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung angewendet. Ein Beispiel für ein Steuerungsprinzip, bei dem die dezentrale Abstimmung mit Hilfe von Verhandlungsmechanismen durchgeführt wird, bilden Agentensysteme (ZÄPFEL 1998, BONGAERTS et al. 2000, FRESE 2005, SCHUH & GIERTH 2006a).

In Ergänzung zu den zuvor genannten Grundformen sollen hybride Organisationsstrukturen die Vorteile einer zentralen Koordination und die Flexibilität dezentraler Steuerungselemente miteinander verbinden. Neben der Segmentierung von Entscheidungskomplexen, wie bei dezentralen Organisationsstrukturen, erfolgt bei hybriden Organisationsstrukturen zusätzlich eine vertikale Aufteilung (Strukturierung) des Entscheidungsproblems durch über- und untergeordnete Teilentscheidungen. Im Vergleich zu hierarchischen Architekturen nehmen bei hybriden Organisationsstrukturen die Planungsanteile der zentralen Instanz ab, was in einer Reduzierung der Aufgabenkomplexität resultiert. Durch die Verlagerung von planenden, steuernden und kontrollierenden Funktionen nimmt die Komplexität in den lokalen Organisationseinheiten gleichzeitig zu. Im Allgemeinen wird in hybriden Organisationsstrukturen die Grobplanung durch die globale Organisationseinheit durchgeführt. Die ermittelten Ergebnisse werden an die betreffenden lokalen Organisationseinheiten übergeben, welche anschließend die kurzfristige Planung und Steuerung der Abläufe durchführen. Je detaillierter die

zentralen, bereichsübergreifenden Planungsaktivitäten sind, desto geringer sind die Entscheidungsmöglichkeiten in den nachgeordneten lokalen Organisationseinheiten. Ein Anwendungsgebiet für hybride Organisationsstrukturen ist der Bereich der Einzel- und Kleinserienfertigung. Holonic Manufacturing Systems (HMS) sind ein Beispiel für eine Organisationsstruktur mit zentralen und dezentralen Steuerungselementen (BULLINGER 1993, FRESE 2005, SCHOLZ-REITER et al. 2008, WINDT 2008).

In dezentralen und hybriden Steuerungsstrukturen besitzen die einzelnen Organisationseinheiten einen definierten Grad an Entscheidungs- und Informationsautonomie. Die *Entscheidungsautonomie* einer Einheit gibt an, bis zu welchem Grad eine Organisationseinheit (global/lokal) bei ihren Entscheidungen frei von Beschränkungen ist. Dies ist mit der Festlegung und Übertragung von spezifischen Entscheidungskompetenzen an eine Organisationseinheit und einer daraus resultierenden Ergebnisverantwortung verbunden. Ein zunehmender Grad an Dezentralisierung von Aufgaben führt zu einer Vergrößerung der Entscheidungsautonomie der entsprechenden lokalen Organisationseinheiten. Wenn keine Entscheidungsautonomie vorliegt, werden entsprechende Vorgaben von anderen Organisationseinheiten ausschließlich durch die betrachtete Organisationseinheit ausgeführt. Durch die *Informationsautonomie* wird festgelegt, in welchem Umfang eine Organisationseinheit Informationen an über- oder untergeordnete (vertikale Informationsautonomie) bzw. hierarchisch unabhängige (horizontale Informationsautonomie) Einheiten weiterleiten muss. Besitzt eine Organisationseinheit Informationsautonomie, so muss diese nicht alle bzw. im Grenzfall keine Informationen an andere Einheiten weiterleiten (FRESE 2005).

Bei der Erstellung von Organisations- und Steuerungsstrukturen in Produktionssystemen sind deshalb erstens die jeweiligen Entscheidungskompetenzen der vorliegenden Organisationseinheiten und zweitens die Kommunikationsbeziehungen zwischen diesen festzulegen. In diesem Zusammenhang bietet die Unterscheidung zwischen Autonomie- und Abstimmungskosten eine vielversprechende Möglichkeit zur Analyse und Bewertung der jeweiligen Entscheidungs- und Informationsautonomie in einem Produktionssystem. Wie in Abbildung 19 verdeutlicht, führt ein zunehmender Grad an Autonomie zu reduzierten Kommunikationsaufwendungen. Gleichzeitig werden Interdependenzen und aktuelle Informationen aus anderen Organisationseinheiten nur zum Teil bzw. gar nicht berücksichtigt. Hieraus entstehen wiederum Effizienzverluste (Abweichung vom theoretisch möglichen Optimum), die sich in den Kosten der Autonomie abbilden. Durch die Berücksichtigung von Entscheidungsinterdependenzen und die Abstimmung mit anderen Organisationseinheiten lassen sich die Planungsergebnisse theoretisch optimieren. Die resultierenden Kommunikationsaktivitäten in

einem betrachteten Produktionssystem nehmen jedoch gleichzeitig zu und führen zu einem Anstieg der Abstimmungskosten (FRESE 2005, KRÄKEL 2007).

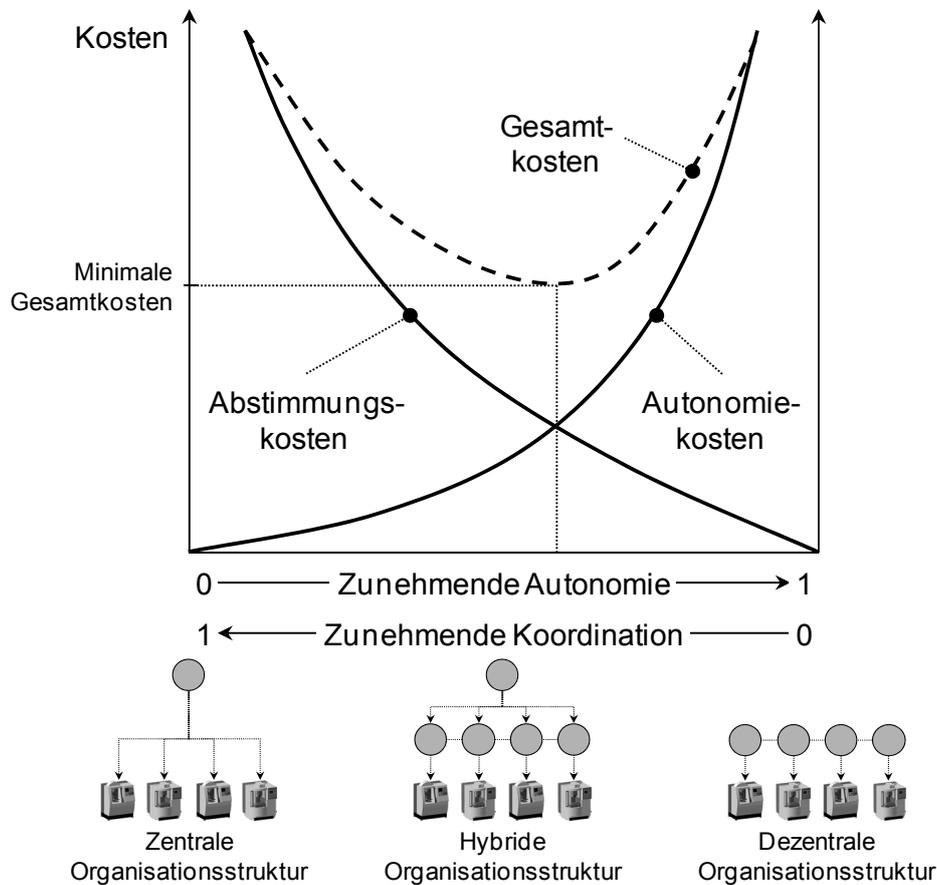
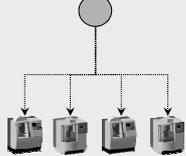
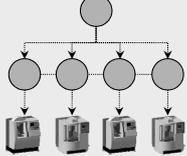
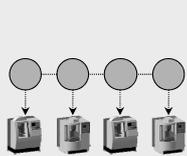


Abbildung 19: Zusammenhang zwischen Autonomie- und Abstimmungskosten (in Anlehnung an FRESE 2005)

Aus dem sogenannten *Dilemma der Organisationstheorie* (KRÄKEL 2007) wird deutlich, dass ein Mittelweg zwischen der Koordination der lokalen Organisationseinheiten durch ein zentrales Entscheidungssystem und dem Einräumen von Entscheidungskompetenzen und Ergebnisverantwortung für die lokalen Einheiten in einem Produktionssystem gefunden werden muss. Letztere erlaubt die echtzeitnahe Reaktion auf unvorhergesehene Ereignisse (z. B. Maschinenausfall, unzureichende Produktqualität) und die lokale, zustandsbezogene Optimierung von Abläufen. In Abbildung 20 werden die charakteristischen Eigenschaften der verschiedenen Organisationsstrukturen zusammenfasst und hinsichtlich der in Kapitel 3 definierten Anforderungen bewertet.

Organisationsstruktur	Zentral	Hybrid	Dezentral
Kriterium			
Bereichsübergreifende Optimierung	●	◎	○
Zentraler Koordinationsaufwand	●	◎	○
Bereichsübergreifende Transparenz	●	◎	○
Lokale Transparenz von Abläufen	○	◎	●
Lokale Entscheidungsfreiräume	○	◎	●
Berücksichtigung aktueller produkt- und ressourcenspezifischer Informationen	○	●	●
Robustheit gegenüber Störungen	○	●	●
Adaption von Produktionsabläufen	○	●	●
Anwendungsgebiete	Großserien- und Massenfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung	Einzel- und Kleinserienfertigung

### Legende:

Erfüllungsgrad Kriterium: ● - hoch    ◎ - mittel    ○ - gering

Abbildung 20: Bewertung verschiedener Organisationsstrukturen

Eine Grundvoraussetzung für die erfolgreiche Bewältigung der Koordinations- und Abstimmungsaufwände zwischen den (teil-)autonomen Organisationseinheiten ist ein effizientes Informationsmanagement (KLETTI 2006, PILLER 2006). Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien bilden die Grundlage für die Speicherung, Verarbeitung und Kommunikation von Daten und Informationen. Der Einsatz von IuK-Technologien stellt somit eine vielversprechende Möglichkeit dar, um den erhöhten Kommunikations- und Abstimmungsbedarf in dezentralen und hybriden Organisationsstrukturen effizient handhaben zu können (PICOT et al. 2003, KURBEL 2005, PILLER 2006, WINDT & HÜLSMANN 2007). Im folgenden Abschnitt wird auf die Bedeutung von automatischen Identifikationstechnologien detailliert eingegangen.

## 4.2.2 Bedeutung von Informations- und Kommunikationstechnologien

### 4.2.2.1 Automatische Identifikationstechnologien

Die Entwicklungen im Bereich der IuK-Technologien sind gekennzeichnet durch eine fortschreitende Miniaturisierung von informationstechnischen Systemkomponenten, eine steigende Leistungsfähigkeit von Prozessoren, eine zunehmende Menge von gespeicherten Informationen auf kleinstem Raum sowie einen hohen Informationsvernetzungsgrad (BSI - BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT IN DER INFORMATIONSTECHNIK 2004). Daher bietet der Einsatz innovativer Technologien, wie z. B. automatischer Identifikationssysteme (Auto-ID-Systeme), die Möglichkeit, neue Steuerungsstrategien für die Produktion erfolgreich realisieren zu können. Durch die Schließung der Lücke zwischen der virtuellen, d. h. in der Software abgebildeten, und der realen Welt (z. B. Transponder) können Medienbrüche vermieden und die Abbildungsqualität der realen in die virtuelle Welt nachhaltig optimiert werden. IuK-Technologien und insbesondere Auto-ID-Systeme können somit einen bedeutenden Beitrag für die durchgängige Informationsversorgung der entsprechenden Organisationseinheiten in Produktionssystemen leisten (FLEISCH et al. 2005). Im Folgenden werden zunächst die führenden Identifikationstechnologien mit ihren Eigenschaften vorgestellt.

Auto-ID-Systeme werden zur automatischen Identifikation von Objekten, Tieren oder Personen eingesetzt (KERN 2007). Aufgrund seiner geringen Kosten und der hohen Standardisierung zählt der *Barcode* zu den am weitesten verbreiteten Auto-ID-Systemen. Dieser besteht aus einem Feld von parallel angeordneten Strichen und Trennlücken in einem bestimmten Muster und wird durch optische Laserabtastung ausgelesen (FINKENZELLER 2008). Die zweidimensionalen Stapel- und Matrixcodes stellen Weiterentwicklungen des eindimensionalen Barcodes dar und bieten den Vorteil einer höheren Informationsdichte. Zu den Nachteilen des Barcodes zählt, dass für das Auslesen der Informationen eine direkte Sichtverbindung zwischen dem Lesegerät und dem Barcode erforderlich ist. Darüber hinaus ist der Barcode relativ anfällig gegenüber Feuchtigkeit, Verschmutzung und Beschädigung (KERN 2007).

Als *OCR (Optical Character Recognition)* werden Verfahren zur Klarschrifterkennung bezeichnet. Dazu wurden spezielle Schrifttypen entwickelt, die nicht nur von Menschen, sondern auch automatisch von Maschinen gelesen werden können. Die wichtigsten Vorteile von OCR-Systemen sind die relativ hohe Informationsdichte sowie die Möglichkeit, die Informationen zur Kontrolle oder im Notfall auch visuell erfassen zu können. Demgegenüber stehen die geringe Lese-

reichweite und der im Vergleich zu Barcode- und Chipkartensystemen hohe Preis (KERN 2007, FINKENZELLER 2008).

*Chipkarten* sind elektronische Datenspeicher, die aufgrund der besseren Handhabung in eine Plastikkarte integriert sind. Über Kontaktfedern wird in einem Lesegerät eine galvanische Verbindung zu den Kontaktflächen der Chipkarte hergestellt. Einer der wesentlichen Vorteile der Chipkarten liegt darin, dass die in ihnen gespeicherten Informationen weitestgehend gegen unerwünschten Zugriff und Manipulation geschützt sind. Aus diesem Grund werden diese vor allem in sicherheitssensiblen Anwendungen wie dem bargeldlosen Zahlungsverkehr eingesetzt. Ein Nachteil der Chipkarten ist die Anfälligkeit der Kontakte für Abnutzung, Korrosion und Verschmutzung (KERN 2007, FINKENZELLER 2008).

Auto-ID-Systeme, die eine drahtlose Übertragung von Daten mit Hilfe von Radiowellen ermöglichen, werden als *RFID-Systeme* (*Radio Frequency Identification*) bezeichnet. Die Kommunikation zwischen einem Schreib-/Lesegerät und einem elektronischen Datenträger (Transponder) erfolgt mit Hilfe von elektrischen oder magnetischen Feldern bzw. elektromagnetischen Wellen. Da für die Kommunikation weder ein physischer Kontakt noch ein Sichtkontakt zwischen dem Schreib-/Lesegerät und dem Transponder erforderlich ist, können die Funktionalitäten und Einsatzmöglichkeiten gegenüber herkömmlichen Auto-ID-Systemen um ein Vielfaches erweitert werden. Als Beispiel kann in diesem Zusammenhang die gleichzeitige Erfassung mehrerer Objekte (Pulkfähigkeit) sowie die nahezu unbegrenzte Wiederbeschreibbarkeit der Transponder genannt werden (KERN 2007, FINKENZELLER 2008). Die hohen Kosten für die Beschaffung und die Implementierung, die fehlende Standardisierung und der schwer sicherzustellende Informations- bzw. Datenschutz erweisen sich teilweise als Hindernis bei der Nutzung der RFID-Technologie (BSI - BUNDESAMT FÜR SICHERHEIT IN DER INFORMATIONSTECHNIK 2004). Tabelle 1 gibt einen Überblick über die charakteristischen Merkmale der vorgestellten Identifikationstechnologien.

Systemparameter	RFID	Barcode	Chipkarte	OCR
<b>Sichtkontakt erforderlich</b>	nein	ja	ja	ja
<b>Pulkfähigkeit</b>	möglich	nein	nein	nein
<b>Datendichte und -veränderbarkeit</b>	sehr hoch	gering	hoch	gering
<b>Mechanische, thermische, chemische Einflüsse</b>	gering	hoch	hoch	hoch
<b>Einfluss von Feuchtigkeit und Verschmutzung</b>	kein Einfluss	sehr hoch	möglich (Kontakte)	sehr hoch
<b>Einfluss von Richtung und Lage</b>	kein Einfluss	gering	eine Steckrichtung	gering
<b>Einfluss elektromagnetischer Störquellen</b>	hoch	kein Einfluss	kein Einfluss	kein Einfluss

*Tabelle 1: Vergleich von RFID mit anderen Identifikationstechnologien (in Anlehnung an REINHART et al. 2007, FINKENZELLER 2008)*

Im Hinblick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit bietet die RFID-Technologie zahlreiche Vorteile im Vergleich zu anderen automatischen Identifikationstechnologien. Aus diesem Grund werden die Grundlagen der RFID-Technologie im Folgenden erläutert.

#### 4.2.2.2 Grundlagen der RFID-Technologie

##### Funktionsweise und Aufbau von RFID-Systemen

Ein RFID-System setzt sich aus den drei Komponenten Transponder, Schreib-/Lesegerät und einem Rechner mit Applikationssoftware zusammen (VDI-RICHTLINIE 4416 1998). Der Transponder ist der Datenträger eines RFID-Systems und besteht aus einem Kopplungselement (Sende-/Empfangseinheit) sowie einem elektronischen Mikrochip. Mit Hilfe eines Schreib-/Lesegerätes und einer Antenne werden die Daten aus dem Transponder ausgelesen und bei Bedarf verändert, ergänzt oder gelöscht. Für die Ansteuerung und die Realisierung des Datenaustausches ist das RFID-System an einen Rechner mit einer Applikationssoftware angeschlossen (vgl. Abbildung 21) (KERN 2007).

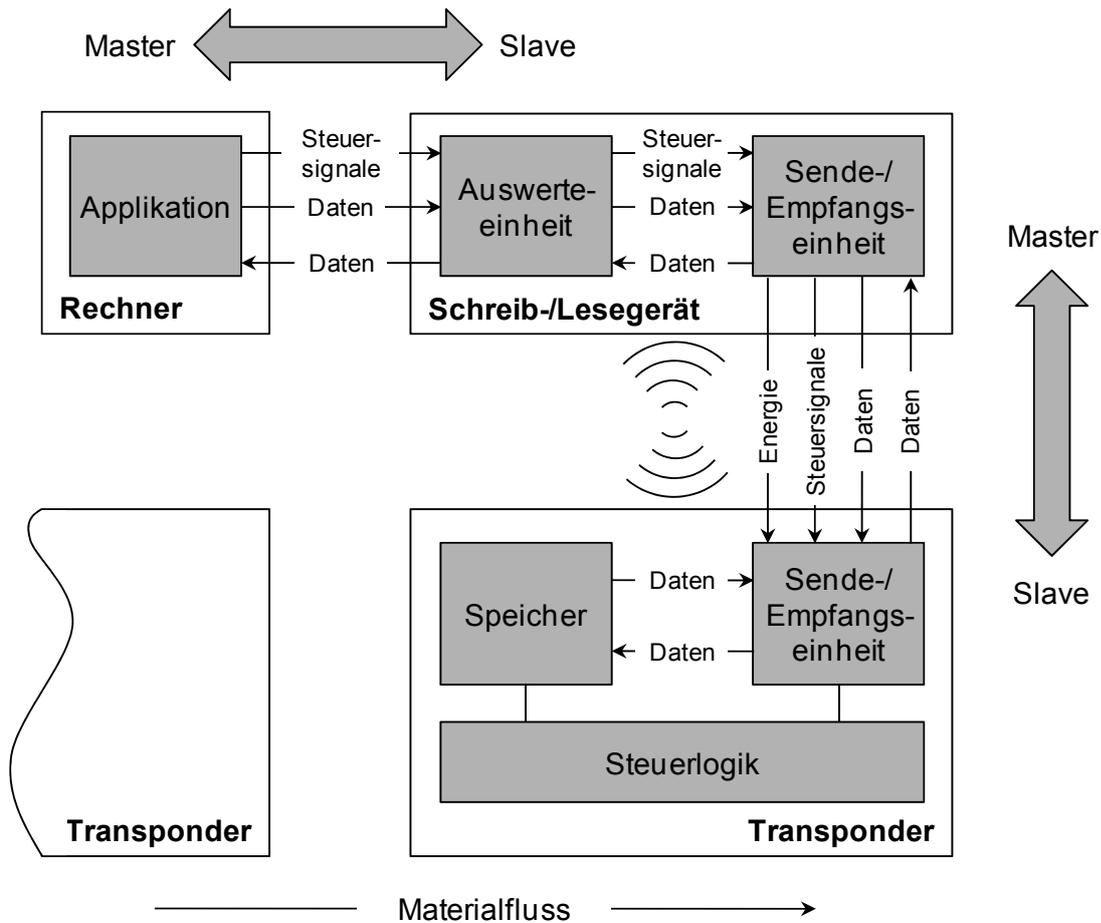


Abbildung 21: Aufbau und Funktionsweise eines RFID-Systems (in Anlehnung an JÜNEMANN & BEYER 1998, FINKENZELLER 2008)

Damit die Applikationssoftware Daten von einem Transponder lesen oder neue Daten darauf hinterlegen kann, wird das Schreib-/Lesegerät als kontaktlose Schnittstelle (Luftschnittstelle) genutzt. Die Schreib- und Leseoperationen werden nach dem Master-Slave-Prinzip durchgeführt. Zwischen den drei Komponenten Rechner, Schreib-/Lesegerät und Transponder besteht eine hierarchische Systemstruktur. Benötigt die Applikation des Rechners eine Information, sendet diese in einem ersten Schritt einen Befehl an das Schreib-/Lesegerät. Um die Anfrage der Applikation auszuführen, baut das Schreib-/Lesegerät im zweiten Schritt eine Verbindung zum Transponder auf. Im ersten Schritt nimmt das Schreib-/Lesegerät die Slave-Rolle ein, während es im zweiten Schritt als Master agiert. Der Transponder reagiert somit ausschließlich auf die Befehle des Schreib-/Lesegerätes und wird nie selbstständig aktiv (FINKENZELLER 2008).

**Physikalische und technische Grundlagen**

Der drahtlose Austausch von Informationen zwischen dem Schreib-/Lesegerät und dem Transponder kann bei der RFID-Technologie mit Hilfe der drei folgenden Verfahren durchgeführt werden (KERN 2007, FINKENZELLER 2008):

- Kapazitive Kopplung durch ein elektrisches Feld
- Induktive Kopplung durch ein magnetisches Feld
- Strahlungskopplung (Backscatter-Kopplung) durch ein elektromagnetisches Feld

Diese physikalische Kopplung stellt zum einen die Energieversorgung des Transponders und zum anderen die Datenübertragung zwischen dem Transponder und dem Schreib-/Lesegerät sicher (KERN 2007, FINKENZELLER 2008).

Die wichtigsten technischen Unterscheidungskriterien von RFID-Systemen sind die Sendefrequenz des Schreib-/Lesegerätes, das Kopplungsverfahren und die Reichweite des Systems (FINKENZELLER 2008). Bei heutigen RFID-Systemen gibt es sechs maßgebliche Sendefrequenzen. Diese Sendefrequenzen werden unterteilt in einen Low-Frequency-Bereich (LF), einen High-Frequency-Bereich (HF), einen Ultra-High-Frequency-Bereich (UHF) und einen Mikrowellenbereich (MW). Der Bereich von 120 kHz bis 135 kHz wird als LF und der Bereich um 13,56 MHz als HF bezeichnet. Die Frequenzbereiche um 868 MHz (Europa) sowie 915 MHz (USA) sind unter der Bezeichnung UHF und die Bereiche um 2,45 GHz sowie 5,8 GHz unter dem Begriff MW zusammengefasst (vgl. Tabelle 2) (LAMPE et al. 2005, KERN 2007, FINKENZELLER 2008). Nach Aussage von KERN (2007) wird der HF-Frequenzbereich derzeit weltweit am meisten genutzt. RFID-Systeme im LF- und HF-Bereich nutzen den Effekt der induktiven Kopplung, während Systeme im UHF-Bereich auf Basis einer Backscatter-Kopplung arbeiten (FINKENZELLER 2008).

Bezeichnung	LF	HF	UHF	MW
Frequenzbereich	120 kHz bis 135 kHz	um 13,56 MHz	um 868 MHz und um 915 MHz	um 2,45 GHz und um 5,8 GHz

*Tabelle 2: Übersicht der Sendefrequenzen für RFID-Systeme*

Für jede Sendefrequenz sind gesetzliche Grenzwerte der maximalen Sendeleistung festgelegt. Weiterhin wirkt sich die Sendefrequenz auf die Reichweite, die Datenübertragungsrate sowie die Empfindlichkeit gegenüber Zwischen- und Hin-

tergrundmaterialien aus (LAMPE et al. 2005, KERN 2007). Für weiterführende Informationen bezüglich der physikalischen und technischen Grundlagen von RFID-Systemen wird auf einschlägige Quellen verwiesen (FLEISCH & MATTERN 2005, KERN 2007, FINKENZELLER 2008).

### 4.2.3 Ansätze zur sensorgestützten Produktionssteuerung

In den vergangenen Jahren wurde in mehreren Forschungsarbeiten (z. B. MCFARLANE et al. 2003, QIU 2007, HUANG et al. 2011) der Bedarf für die Nutzung von Sensorelementen zur Steigerung der Flexibilität und der Adaptivität in Produktionsabläufen erkannt. Informations- und Kommunikationstechnologien sind in diesem Zusammenhang ein wichtiger Befähiger für die technische Realisierung und die Erhöhung der Autonomie in Produktionssystemen. Im Folgenden werden ausgewählte Ansätze zur RFID-basierten und sensorgestützten Steuerung von Produktionsabläufen vorgestellt.

Nach SCHOLZ-REITER & FREITAG (2007) stellt die Ausstattung bzw. Integration von Bauteilen oder Produkten mit Identifikationselementen (z. B. RFID-Transponder) einen ersten wichtigen Schritt in Richtung autonomer Objekte dar. ZBIB et al. (2008) haben in diesem Zusammenhang vier unterschiedliche Klassen dieser sogenannten intelligenten Produkte definiert (vgl. Abbildung 22).

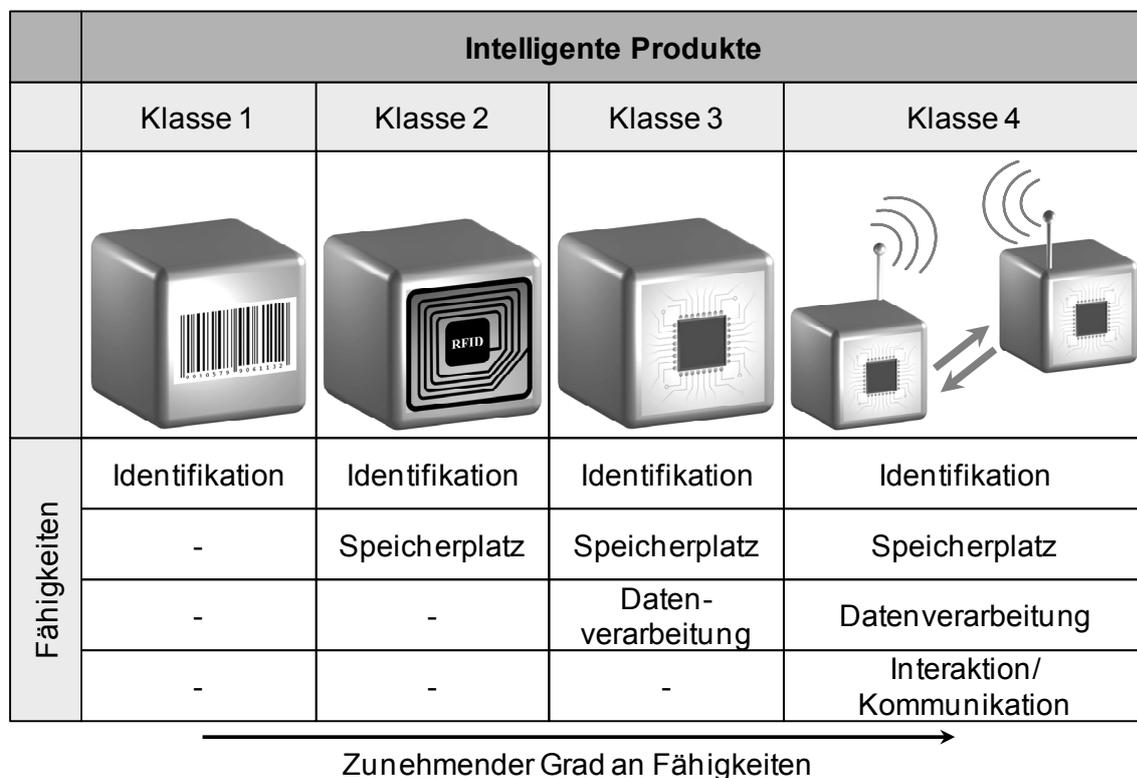
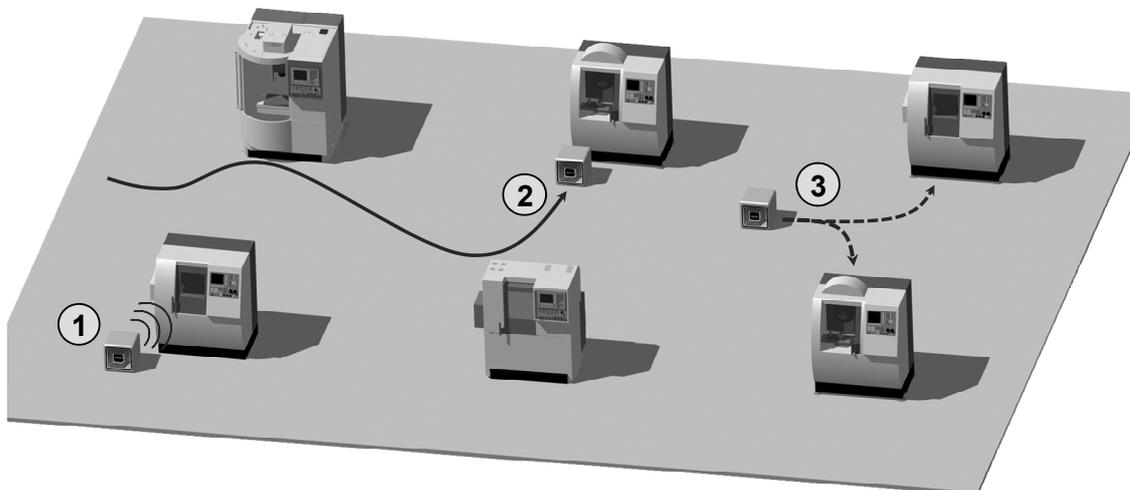


Abbildung 22: Die vier Klassen eines intelligenten Produktes

Während ein intelligentes Produkt der ersten Klasse ausschließlich eine eindeutige Identifikationsnummer (z. B. Barcode) besitzt, wird dieses in der zweiten Klasse durch einen eigenen Speicherplatz, auf dessen Inhalt lesend und schreibend zugegriffen werden kann (z. B. RFID), ergänzt. Produkte der dritten Klasse besitzen zusätzlich die Möglichkeit zur eigenständigen Datenverarbeitung und sind somit in der Lage, eigene Entscheidungen zu treffen. Diese Möglichkeiten werden durch die Fähigkeit zur Interaktion mit der Umwelt bei Produkten der vierten Klasse vervollständigt. In Anlehnung an die zuvor genannte Einteilung sehen HUANG et al. (2009) die folgenden, aufeinander aufbauenden Nutzenpotenziale als wesentliche Aspekte für die Einführung von intelligenten Produkten bzw. der RFID-Technologie in Produktionsumgebungen an (vgl. Abbildung 23):

- Automatische Identifikation und Datenerfassung von Objekten (z. B. Produkte, Ladungsträger) zur Erreichung eines geschlossenen Informationskreislaufes;
- Effiziente Erfassung und Steuerung des Umlaufbestandes in Produktionsumgebungen durch die aufwandsarme Verfolgung und Rückverfolgung (Tracking & Tracing) von Fertigungsaufträgen;
- Grundlage für die adaptive Planung und Steuerung von Produktionsabläufen;



**Legende:**

- ① Automatische Identifikation und Datenerfassung
- ② Verfolgung und Rückverfolgung von Fertigungsaufträgen (Tracking & Tracing)
- ③ Adaptive Planung und Steuerung von Produktionsabläufen

*Abbildung 23: Nutzenpotenziale der Einführung von intelligenten Produkten in Produktionsumgebungen*

Die Bedeutung einer hohen Transparenz und Genauigkeit der Daten im Hinblick auf eine zustandsbezogene Entscheidungsfindung in der Produktionssteuerung wurde in einigen Forschungsarbeiten detailliert betrachtet. In diesem Zusammenhang wurden Vorschläge für die RFID-basierte Verfolgung des Umlaufbestandes und die entsprechende Verknüpfung mit betrieblichen Planungs- und Informationssystemen gemacht (z. B. HUANG et al. 2007, QIU 2007, ZHOU et al. 2007, HUANG et al. 2008b). Neben der reinen Verfolgung von Objekten (Produkten bzw. Ladungsträgern) wurden in einigen Arbeiten auch die Möglichkeiten und die Bedeutung der dezentralen Speicherung von Daten auf dem RFID-Transponder analysiert (z. B. QIU 2007) (vgl. auch Abschnitt 7.3 ab Seite 138).

POON et al. (2007) haben ein RFID-basiertes Assistenzsystem für die manuelle Werkstattfertigung entwickelt. Auf Basis einer kontinuierlichen Verfolgung der einzelnen Produktionsaufträge und der Überwachung des Auftragsstatus können durch mathematische Auswertungen (z. B. Berechnung der tatsächlichen Auftrags-Durchlaufzeit) Abweichungen im Produktionsfortschritt erkannt werden. Mit Hilfe eines regelbasierten Systems werden den entsprechenden Werkern bzw. den betroffenen Fertigungsbereichen frühzeitig Informationen über mögliche Störungen bereitgestellt. Aufgrund der gestiegenen Transparenz und der frühzeitigen Störungserkennung konnten POON et al. (2007) die Reaktionszeit bei unvorhergesehenen Ereignissen um 30 % bis 50 % senken. KOIKE et al. (2008) verfolgen den Umlaufbestand auch mit RFID und führen einen kontinuierlichen Soll-/Ist-Abgleich des Produktionsfortschrittes mit den Planungssystemen durch. Ab einer definierten Abweichung wird eine Umplanung durch eine dynamische Anpassung der entsprechenden Auftragslosgrößen durchgeführt. Die beiden zuvor genannten Arbeiten fokussieren sich auf die Auftragsüberwachung und die frühzeitige Identifizierung von Abweichungen. Eine zustandsbezogene Anpassung des Produktionsablaufes infolge von Maschinenstörungen oder unzureichenden Produktqualitäten wird nicht betrachtet.

Neben der automatischen Identifikation und der Überwachung von Umlaufbeständen bedeutet die adaptive Planung und Steuerung von Produktionsabläufen einen weiteren Schritt bei der Integration der RFID-Technologie in Produktionsumgebungen. Durch den ergänzenden Einsatz von geeigneten Systemen (z. B. Agentensysteme) können die wesentlichen Elemente eines Produktionssystems bzw. deren virtuelle Repräsentanten, wie beispielsweise Produkte und Ressourcen, selbstständig Informationen aufnehmen und verarbeiten sowie Entscheidungen treffen und diese anschließend umsetzen (MCFARLANE et al. 2003, BÖSE & WINDT 2007).

Im Rahmen des Sonderforschungsbereiches (SFB) 637 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) (Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen) wurde die Selbststeuerung als ein vielversprechender Ansatz zur Erhöhung der Systemrobustheit und Vereinfachung von Prozessen identifiziert (SCHOLZ-REITER & HÖHNS 2006, BÖSE & WINDT 2007). Der Begriff der Selbststeuerung beschreibt nach SCHOLZ-REITER & HÖHNS (2006, S. 749) *„ein Bündel von Prozessen dezentraler Entscheidungsfindung in heterarchischen Strukturen [...] Sie setzt die Fähigkeit und Möglichkeit interagierender Systemelemente zum autonomen Treffen von zielgerichteten Entscheidungen voraus“*. Den zu Beginn dieses Abschnittes definierten intelligenten Produkten der Klasse 2 ist es demnach unter Berücksichtigung ihrer Zielsetzung möglich, den Weg durch ein Produktionssystem selbst zu bestimmen. Voraussetzung für die Entscheidungsfindung im Produktionsablauf ist allerdings die Interaktion zwischen den eingesetzten Objekten. Die Funktionalitäten der Klassen 3 und 4 werden durch die Interaktion mit einem Agentensystem erreicht. Die individuellen Zielsetzungen der einzelnen Elemente gilt es durch Verhandlungen aufeinander abzustimmen (SCHOLZ-REITER & HÖHNS 2006, BÖSE & WINDT 2007). Der SFB 637 fokussiert sich auf die theoretischen Grundlagen der Selbststeuerung und in diesem Zusammenhang insbesondere auf den Bereich der überbetrieblichen Logistik.

LIU et al. (2005), HIGUERA & MONTALYO (2007) und HUANG et al. (2008a) verknüpfen die RFID-Technologie mit Agentensystemen, MCFARLANE et al. (2003) integriert RFID in ein Holonic Manufacturing System (HMS). Ein softwarebasierter Auftrags- bzw. Produktagent ist in den vorliegenden Arbeiten einem physischen Produkt bzw. Ladungsträger mit einem RFID-Transponder zugeordnet. Die genannten Forschungsarbeiten spezialisieren sich auf die Ablaufplanung in Produktionssystemen. Ein formaler Abgleich der Anforderungen eines Produktionsauftrages mit den technologischen Fähigkeiten der zur Verfügung stehenden Ressourcen findet in den erwähnten Quellen nicht statt. Die RFID-Technologie wird dazu genutzt, um Produkte eindeutig zu identifizieren, die entsprechenden Arbeitsvorgänge abzurufen und den Bearbeitungsstatus eines Auftrages zu aktualisieren. Vorliegende Störungen auf Maschinen- bzw. Ressourcenebene können von den Agentensystemen durch eine entsprechende Umplanung auf Alternativsysteme, die bei den zugehörigen Agenten hinterlegt sind, berücksichtigt werden. Eine Anpassung des Produktionsablaufes aufgrund unzureichender Produktqualitäten oder eine Referenzierung auf aktuelle Bauteilinformationen (z. B. Qualitätsdaten, Toleranzen) ist in den betrachteten Arbeiten nicht vorgesehen. Bei MCFARLANE et al. (2003) werden durch das HMS nicht erfolgreich abgeschlos-

sene Arbeitsvorgänge erkannt und der Auftrag für eine Weiterverarbeitung gesperrt.

Neben der Nutzung der RFID-Technologie als Befähiger zur Erhöhung der Transparenz und Autonomie in Produktionssystemen wurden in weiteren Forschungsarbeiten die Nutzung von Mikrosystemen und die gezielte Veränderung von Werkstoffeigenschaften bzw. -oberflächen als vielversprechende Alternativen identifiziert. Im Rahmen des vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) geförderten Projektes „SoPro“ (Selbstorganisierende Produktion) sollen mit Hilfe sogenannter Process-eGrains Methoden für eine autonome, selbstorganisierende Produktion entwickelt werden, die einen zustandsbezogenen Fertigungsablauf ermöglichen. Process-eGrains sind robuste, miniaturisierte und kostengünstige Funksensorknoten mit einer autarken Energieversorgung. Die Mikrosysteme mit einer eigenen Recheneinheit sind in der Lage, Informationen dezentral zu erfassen, zu verarbeiten, zu speichern und zu kommunizieren. Sie repräsentieren somit ein intelligentes Produkt der vierten Klasse. Durch die Ausstattung von Produkten bzw. Ladungsträgern, Fertigungsressourcen und Werkzeugen mit Process-eGrains kann ein Kommunikationsnetzwerk innerhalb der Produktion aufgebaut und es können Informationen zwischen den einzelnen Netzwerkpartnern ausgetauscht werden. Mit Hilfe eines integrierten Agentensystems werden die einzelnen Bearbeitungsaufgaben auf Basis marktwirtschaftlicher Prinzipien zwischen den beteiligten Maschinen und Aufträgen dezentral koordiniert. Bei technischen Störungen (z. B. Ressourcenausfall) kann mit den genannten Prinzipien der Selbstorganisation eine Anpassung des Fertigungsablaufes durchgeführt werden (CHEMNITZ et al. 2010, SOPRO 2011). Der Schwerpunkt im erwähnten Projekt wird insbesondere auf die zustandsbezogene Ablaufplanung mit Hilfe selbstorganisierender Ansätze gelegt. Eine Referenzierung auf produktbezogene Informationen oder eine Adaption des Produktionsablaufes aufgrund unzureichender Bauteilqualitäten wird nicht betrachtet.

Der Sonderforschungsbereich 653 „Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus“ verfolgt das langfristige Ziel, die physikalische Trennung zwischen Bauteilen und den zugehörigen Informationen aufzuheben. Der neologistische Terminus „Gentelligenz“ setzt sich aus den beiden Begriffen „Genetik“ und „Intelligenz“ zusammen. Die gentellige Technologie ermöglicht es zum einen, mit Hilfe von geeigneten Materialien oder Sensorelementen Informationen aus der Umwelt (z. B. einwirkende Kräfte, Temperaturen) aufzunehmen, zu verarbeiten und inhärent auf dem Bauteil zu hinterlegen (Intelligenz). Zum anderen bleiben die während des Herstellungsprozesses und der Nutzungsphase aufgenommenen Informationen über den gesamten Lebenszyklus erhalten und können an nachfolgende Produktgenerationen weitergegeben werden (Genetik) (DENKENA et al. 2005,

NYHUIS et al. 2008). NYHUIS et al. (2009) entwickelten im Rahmen des SFB 653 einen Ansatz für eine bauteilgetriebene Montagesteuerung. Das Hauptziel der Methode ist die dynamische Reihenfolgebildung von Montage- und den zugehörigen Versorgungsaufträgen. Durch eine dezentrale Kommunikation der entsprechenden Bauteile kann die Bearbeitungsreihenfolge der einzelnen Komponenten einer Baugruppe an den unterschiedlichen Arbeitsstationen echtzeitnah aufeinander abgestimmt werden. Verzögerungen einzelner Produktkomponenten im Produktionsablauf werden erkannt und resultieren in einer Anpassung der Prioritäten bzw. der Bearbeitungsreihenfolgen der restlichen Bauteile einer betroffenen Baugruppe an den einzelnen Arbeitsstationen. Um Materialflussabbrisse aufgrund fehlender Bauteile zu verhindern, werden beim Vorliegen einer Störung an einem Arbeitssystem diejenigen Aufträge vorgezogen, die das gestörte System nicht durchlaufen müssen. Die Arbeiten im Rahmen des SFB 653 setzen ihren Schwerpunkt auf die technische Realisierung von gentelligenten Bauteilen. Im Bereich der Ablaufsteuerung ist der Sonderforschungsbereich auf eine zustandsbezogene Reihenfolgebildung, die durch eine bauteilbezogene Abstimmung erreicht wird, fokussiert. Eine Berücksichtigung von bauteilspezifischen Informationen und Zuständen für die Adaption von Produktionsabläufen findet nicht statt.

### 4.2.4 Zwischenfazit

Im vorliegenden Abschnitt zur adaptiven Steuerung von Produktionsabläufen wurden die Ausprägungen von Organisationsstrukturen vorgestellt. Die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Planung und Steuerung sowie die Wechselwirkungen mit zentralen Optimierungsgrößen und die Flexibilität beim Auftreten von unvorhergesehenen Ereignissen wurden diskutiert. Es wurde festgestellt, dass für den Bereich der auftragsbezogenen Produktion eine zunehmende lokale Entscheidungs- und Informationsautonomie mit einer Verlagerung von planenden, steuernden und kontrollierenden Funktionen in die Werkstattebene notwendig ist. Ein wichtiges Element zur erfolgreichen Realisierung stellen in diesem Zusammenhang moderne IuK-Technologien dar. Die Bedeutung von automatischen Identifikationstechnologien und insbesondere der RFID-Technologie wurde ausführlich dargelegt. Am Beispiel von ausgewählten Forschungsarbeiten wurden drei aufeinander aufbauende Stufen der Integration von intelligenten Produkten in Produktionsabläufe und deren Einbindung in zugehörige Steuerungsstrategien analysiert.

Trotz der vorgestellten Ansätze zur adaptiven Steuerung von Fertigungsabläufen entsteht durch die zunehmende produkt- und prozessbezogene Komplexität ein wachsendes Störpotenzial in der Produktion. Aufgrund der hohen Kapitalintensi-

tät kommt es durch störungsbedingte Stillstände zum einen zu hohen Kosten und zum anderen zu verlängerten Auftrags-Durchlaufzeiten, die, aufgrund der niedrigen Zeit- und Mengenpuffer, in einer geringen Termintreue enden (HEIL 1995, WILDEMANN 1995). Daraus entsteht die Forderung nach

- einer kurzfristigen Behebung der Störungsursachen und
- einer Minimierung der Störungsauswirkungen.

Die diskutierten Forschungsansätze konzentrieren sich insbesondere auf die effiziente Planung und Durchführung von Produktionsabläufen. Störungen (z. B. Maschinenausfall) bzw. Abweichungen im Produktionsablauf (z. B. Verzögerungen) werden erkannt und die Störungsauswirkungen können durch eine entsprechende Anpassung des Produktionsablaufes minimiert werden. Eine Identifizierung der Störungsursache bzw. der Möglichkeiten zur Behebung der Störungsursache ist mit den vorgestellten Ansätzen nicht möglich. Darüber hinaus findet keine explizite Betrachtung des individuellen Produktes hinsichtlich seines Zustandes (z. B. Qualitätsdaten) und möglicher Auswirkungen auf den weiteren Produktionsablauf statt. Im nachfolgenden Abschnitt wird daher auf die Thematik des Störungsmanagements eingegangen und es werden ausgewählte Forschungsarbeiten zu deren effizienten Identifizierung und Behebung diskutiert.

### 4.3 Verfahren zum autonomen Störungsmanagement

#### 4.3.1 Störungsmanagement

Wie im vorangegangenen Abschnitt erläutert, nimmt die Relevanz von Störungen und deren effizienter Behandlung durch die ansteigende Komplexität von Produkten und zugehörigen Prozessen zu. Dies gilt insbesondere für hoch automatisierte Fertigungs- und Montagesysteme (EVERSHEIM 1989). In der Literatur liegt eine Vielzahl an Definitionen für den Störungsbegriff vor. Der VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION (REFA) (1993, S. 173) versteht unter Störungen *„Ereignisse, die unerwartet eintreten und eine Unterbrechung oder zumindest Verzögerung der Aufgabendurchführung zur Folge haben; sie bewirken eine wesentliche Abweichung der Ist- von den Soll-Daten.“* HEIL (1995, S. 32) definiert Störungen als *„zeitlich befristete Zustände der Wertschöpfungskette, in denen durch das Einwirken von Störgrößen auf die Produktionsfaktoren und deren Kombinationsprozess eine unmittelbar festgestellte Abweichung vom optimalen Prozessverlauf und/oder dessen Ergebnis entsteht.“* WILDEMANN (1995) sieht die zeitliche Dimension als zentrales Definitionsmerkmal des Stö-

rungsbegriffes an. Zusammengefasst können Störungen damit als „*unbeabsichtigt eintretende, unerwünschte sowie zeitlich befristete Zustände*“ charakterisiert werden, die „*sowohl einen konkreten Zeitpunkt des Eintretens als auch einen exakten Zeitpunkt der Beseitigung besitzen*“ (CZAJA & VOIGT 2009, S. 3).

Im Gegensatz hierzu liegt dem Fehlerbegriff eine zeitpunktbezogene Merkmals-sicht zugrunde (HEIL 1995, WILDEMANN 1995). Nach dem VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION (REFA) (1993, S. 76) ist ein Fehler eine „*unzulässige Abweichung der Ist-Merkmalwerte eines Merkmals vom Sollwert*“, der durch eine physikalische Messung erfasst werden kann (EVERSHEIM 1992). Nach Definition des VDI (1992, S. 135) gibt das Vorliegen einer Fehlermeldung einen „*Hinweis, dass ein Material, ein Erzeugnis [...] nicht den Anforderungen entspricht.*“

Der Störungs- und der Fehlerbegriff stehen nach HEIL (1995) in einer engen Wechselbeziehung zueinander, da ein Fehler in einer Störung resultieren und somit den Charakter einer Störungsursache annehmen kann. Dieser Zusammenhang wird durch die folgende Definition des VDI (1992, S. 128) deutlich, der eine Betriebsstörung als eine „*nicht geplante Unterbrechung eines Arbeitsablaufes*“ sieht, die u. a. durch fehlerhaftes oder fehlendes Material entsteht. Eine unzureichende Produktqualität (Fehler) kann sich demnach beispielsweise negativ auf den weiteren Herstellprozess auswirken und zu zusätzlichen Nacharbeitsschritten führen oder in Ausschuss enden. Dies hat insbesondere einen Einfluss auf die entsprechende Durchlaufzeit, die u. a. durch geänderte Fertigungs- und Montageabläufe sowie durch mögliche Reihenfolgevertauschungen erhöht wird (WILDEMANN 1995).

Für die Behebung von Störungen kann zwischen der präventiven und der reaktiven Strategie unterschieden werden (WILDEMANN 1995). Präventive Maßnahmen haben das Ziel, Störungswirkungen im Vorfeld zu verhindern. Als Beispiele können in diesem Zusammenhang Sicherheitsbestände, maschinelle und personelle Überkapazitäten, Strategien zur Verschleißminderung (Instandhaltung) sowie die Planung zur Störungsvermeidung genannt werden (HEIL 1995, WILDEMANN 1995). Im Gegensatz zur präventiven Planung besitzt die reaktive Strategie einen kurzfristigen Charakter und versucht die Störungen und Störungsauswirkungen durch Neu- und Umplanungen auszugleichen bzw. zu minimieren (WILDEMANN 1995). Die Nutzung reaktiver Strategien ist sinnvoll, wenn hohe Aufwände durch die Einführung präventiver Maßnahmen entstehen und kein deterministischer Zusammenhang zur Störung hergestellt werden kann (HEIL 1995). Nach WILDEMANN (1995) ist insbesondere im Bereich der auftragsbezogenen Produktion, die durch häufig und kurzfristig wechselnde Anfor-

derungen charakterisiert ist, eine Fokussierung auf reaktive Entstörstrategien erforderlich.

Die reaktive Strategie zur Fehler- bzw. Störungsbeseitigung lässt sich nach HOFMANN (1990) und KIM (1995) in die drei Phasen Überwachung, Diagnose sowie Fehler- bzw. Störungsbehebung einteilen (vgl. Abbildung 24). Die *Überwachungsfunktion* hat die Aufgabe, produkt-, ressourcen- oder prozessspezifische Größen zu erfassen und mögliche Fehler bzw. Störungen frühzeitig zu erkennen. Mit Hilfe der *Diagnose* soll der Fehler- bzw. Störungsort, die Fehler- bzw. Störungsart und die Fehler- bzw. Störungsursache ermittelt werden. Auf Basis der diagnostizierten Ursachen kann anschließend ein möglicher Handlungsbedarf abgeleitet werden. In der dritten Phase erfolgt die Festlegung von Handlungsmaßnahmen zur kurzfristigen *Fehler- bzw. Störungsbehebung* und zur mittelfristigen Minimierung der entsprechenden Auswirkungen.

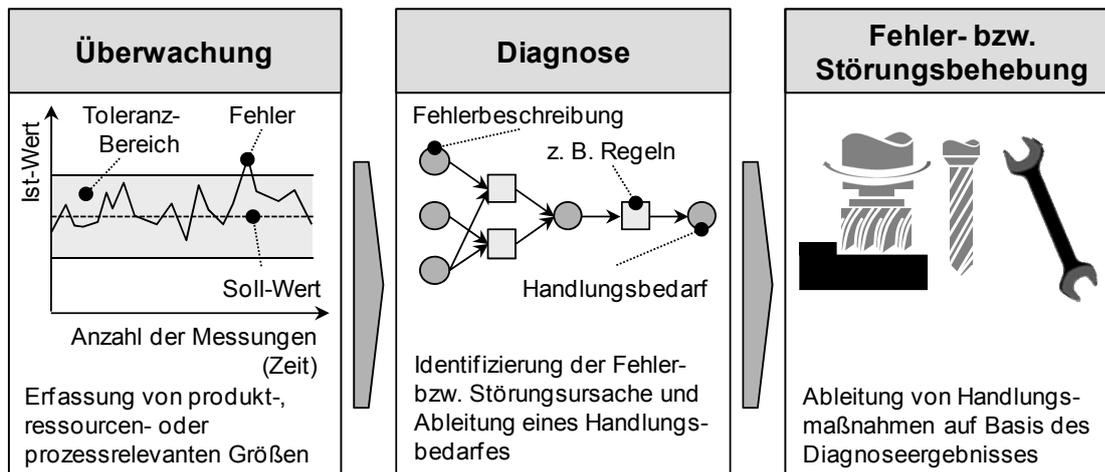


Abbildung 24: Drei Phasen der Fehler- bzw. Störungsbeseitigung

Für den Bereich der Diagnose eignen sich insbesondere wissensbasierte Systeme (HOFMANN 1990, MERTENS 1990, SIMON 1995, SONNENSCHNEIN 1998). Wissensbasierte Systeme können für ein definiertes Anwendungsgebiet Wissen speichern und ein Problem durch logische Schlussfolgerungen lösen (NEBENDAHL 1987). Solche Systeme finden insbesondere in den Gebieten Anwendung, in denen komplexe und schlecht strukturierte Probleme vorliegen, die nicht mit Hilfe von definierten Algorithmen einheitlich bearbeitet werden können (NEBENDAHL 1987, KURBEL 1992). In den folgenden Abschnitten werden der Aufbau und die Funktionsweise von wissensbasierten Systemen detailliert dargestellt. Für weitergehende Informationen zu diesem Themenbereich wird auf einschlägige Literatur verwiesen (z. B. PUPPE 1988, MERTENS 1990, KURBEL 1992, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008).

### 4.3.2 Wissensbasierte Systeme

#### 4.3.2.1 Allgemeines

Ein wissensbasiertes System ist nach KURBEL (1992, S. 18) ein „*Softwaresystem, bei dem das Fachwissen über ein Anwendungsgebiet („Domain knowledge“) explizit und unabhängig vom allgemeinen Problemlösungswissen dargestellt wird.*“ Eine Spezialisierung von wissensbasierten Systemen sind Expertensysteme, die nach PUPPE (1988, S. 2) als Programme definiert werden, „*mit denen das Spezialwissen und die Schlussfolgerungsfähigkeit qualifizierter Fachleute auf eng begrenzten Aufgabengebieten nachgebildet werden soll.*“ Die Herkunft des vorhandenen Wissens in einer Wissensbasis ist somit ein einfaches Merkmal für die Unterscheidung zwischen einem wissensbasierten System und einem Expertensystem (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008). Für den Aufbau und die Nutzung eines Expertensystems muss das Wissen formalisiert, in Computersystemen entsprechend repräsentiert und mit Hilfe von Problemlösungsstrategien manipuliert werden (PUPPE 1988). In Bezug auf die ähnliche softwaretechnische Struktur werden die beiden Begriffe *wissensbasiertes System* und *Expertensystem* im weiteren Teil dieser Arbeit synonym verwendet.

#### 4.3.2.2 Aufbau von wissensbasierten Systemen

Ein entscheidendes Merkmal von Expertensystemen ist die explizite Trennung zwischen der Wissensbasis und der Wissensverarbeitung (MERTENS 1990, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008). Die funktionale Unterscheidung der beiden Bereiche zeigt sich auch in der allgemeinen Architektur eines Expertensystems, das sich in die Hauptkomponenten *Wissensbasis* und *Steuersystem* unterteilen lässt (vgl. Abbildung 25) (PUPPE 1988).

In der *Wissensbasis* wird das spezifische Wissen über einen Anwendungsbereich in einer geeigneten Repräsentationsform hinterlegt. Die Wissensbasis kann wiederum in *bereichsbezogenes Wissen* und *fallspezifisches Wissen* unterteilt werden. Das *bereichsbezogene Wissen* bezieht sich auf das gewählte Anwendungsgebiet des wissensbasierten Systems und umfasst sowohl das Fach- als auch das theoretische Erfahrungswissen des Experten. Neben dem generischen (permanenten) Wissen wird das Wissen über eine spezifische Anwendung dem *fallspezifischen Wissen* bzw. Faktenwissen zugeordnet, welches temporär gespeichert wird (PUPPE 1988, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008).

Im *Steuersystem* sind die Wissensverarbeitungs- bzw. Problemlösungskomponente und verschiedene Benutzerschnittstellen zusammengefasst. Die *Problemlösungs-* bzw. *Inferenzkomponente* interpretiert das in der Wissensbasis hinterlegte Wissen zur Lösung eines spezifischen Problems (PUPPE 1988). Die Auswertung erfolgt durch das Ziehen von Schlussfolgerungen und die Erzeugung von neuen Wissensseinheiten, die der Wissensbasis hinzugefügt werden (KURBEL 1992). Die *Dialogkomponente* bietet die Schnittstelle zum Endnutzer und steuert den Dialog zwischen dem Bediener und dem Expertensystem. Durch die *Erklärungskomponente* wird dem Benutzer die ermittelte Lösungsstrategie erläutert. In diesem Zusammenhang wird beispielsweise die Reihenfolge der einzelnen Schlussfolgerungen verdeutlicht. Darüber hinaus unterstützt die Erklärungskomponente den Experten bei der Suche nach möglichen Fehlern in der Wissensbasis. Die Integration von neuem Wissen sowie die Modifizierung oder Entfernung von bereits bestehendem Wissen durch den Experten erfolgt mit Hilfe der *Wissenserwerbs-* bzw. *Wissensakquisitionskomponente* (NEBENDAHL 1987, PUPPE 1988, KURBEL 1992, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008).

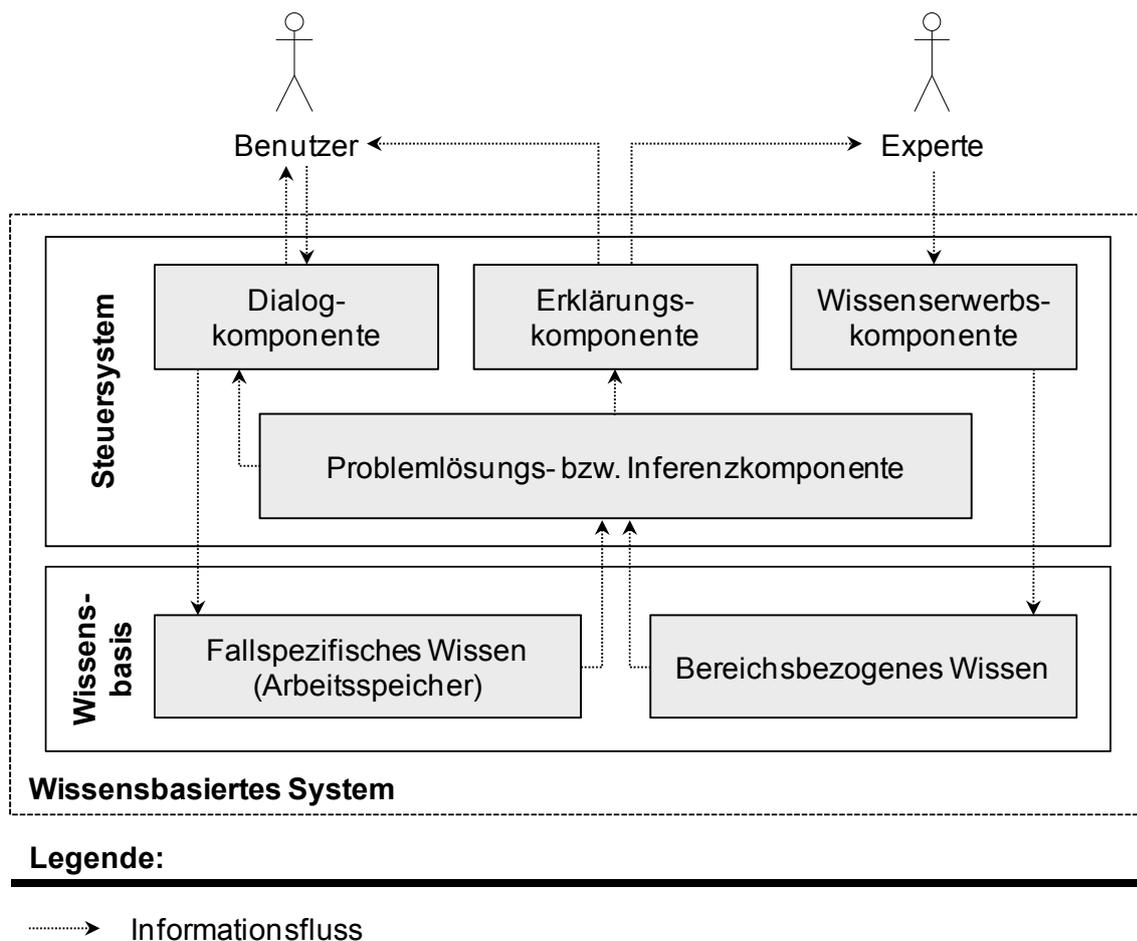


Abbildung 25: Allgemeine Architektur eines Expertensystems (in Anlehnung an PUPPE 1988, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008)

Trotz der funktionalen Trennung zwischen der Wissensbasis und der Wissensverarbeitung stehen diese in einer engen Beziehung zueinander. Zum einen ist die Art der Wissensverarbeitung abhängig von der Repräsentation des Wissens. Zum anderen ist der Aufbau und die Strukturierung der Wissensbasis unter Berücksichtigung der konkreten Problemlösungskomponente durchzuführen (KURBEL 1992, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008). In den beiden folgenden Abschnitten werden die Bereiche der Wissensrepräsentation und der Wissensverarbeitung detailliert vorgestellt.

### 4.3.2.3 Wissensrepräsentation

Wissensbasierte Systeme umfassen ein breites Feld an Anwendungsbereichen und werden beispielsweise in der Auftragsabwicklung (z. B. BIENIEK 2001), in der Montageplanung (z. B. RUDOLF 2007) oder im Bereich des Störungsmanagements (z. B. LESCHKA 1996) eingesetzt. Das für die jeweilige Anwendung notwendige Wissen kann sehr unterschiedlich ausgeprägt sein und hat somit einen Einfluss auf die Art der Wissensrepräsentation. Da die Wissensbasis den wichtigsten Bestandteil eines wissensbasierten Systems darstellt, ist eine geeignete Abbildung des Expertenwissens von großer Bedeutung (KURBEL 1992). In diesem Zusammenhang hat PUPPE (1988) eine Zuordnung von Problemlösungstypen zu den Grundtechniken der Wissensrepräsentation vorgenommen. Für den Problemlösungstyp Diagnostik, der den Bereich des Störungsmanagements und der Qualitätsprüfung einschließt, wurden *Regeln* und *Objekte* als wichtigste Repräsentationsformen identifiziert.

#### Regelbasierte Wissensrepräsentation

Regeln sind die am meisten verwendete Form der Wissensrepräsentation in Expertensystemen. Dies resultiert u. a. aus dem modularen Aufbau sowie der einfachen und unabhängigen Modifizierung und Erweiterbarkeit der Wissensbasis (PUPPE 1988, KURBEL 1992, HAUN 2000). Der grundlegende Vorteil von Regeln im Vergleich zu anderen Wissensrepräsentationen wird in der guten Verständlichkeit der Wissensdarstellung und der Ähnlichkeit mit menschlichen Denkweisen gesehen (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008). Eine Regel besteht aus einer Vorbedingung (Prämisse) und einer Aktion (Konklusion) und lautet: Wenn  $P$ , dann  $Q$  (KURBEL 1992). Im Fall des Eintretens einer Vorbedingung  $P$  wird eine Aktion in Form einer Implikation  $Q$  (Herleitung einer Feststellung) oder einer Handlung  $Q$  durchgeführt (PUPPE 1988). Wenn die Anwendung einer Regel (Feuern) mit einer Handlung verbunden ist, liegt eine sogenannte Produktionsregel vor. Diese Art zur Ableitung von Aktionen wird oft zur Steuerung in Produktionssystemen eingesetzt (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008).

Um eine übersichtliche Darstellung der Regeln in der Wissensbasis und eine effiziente Abarbeitung der Regeln zu gewährleisten, können nach KURBEL (1992) folgende Vereinfachungen genutzt werden:

- Konjunktionen (Und-Verknüpfung) im Prämissen- und Konklusions-Teil (z. B. wenn  $P_1 \& P_2 \& \dots \& P_n$ , dann  $Q_1 \& Q_2 \& \dots \& Q_n$ )
- Disjunktionen (Oder-Verknüpfung) im Prämissen-Teil der Regel (z. B. wenn  $P_1 \vee P_2 \vee \dots \vee P_n$ , dann  $Q$ )

Wenn die beiden Bedingungen nicht erfüllt werden, muss eine vereinfachte Darstellung durch eine Aufgliederung der Regeln erfolgen. Zusätzlich muss durch eine Konsistenzprüfung sichergestellt werden, dass die vorhandene Wissensbasis zu keinen widersprüchlichen Ableitungen führen kann (BEIERLE & KERNISBERNER 2008).

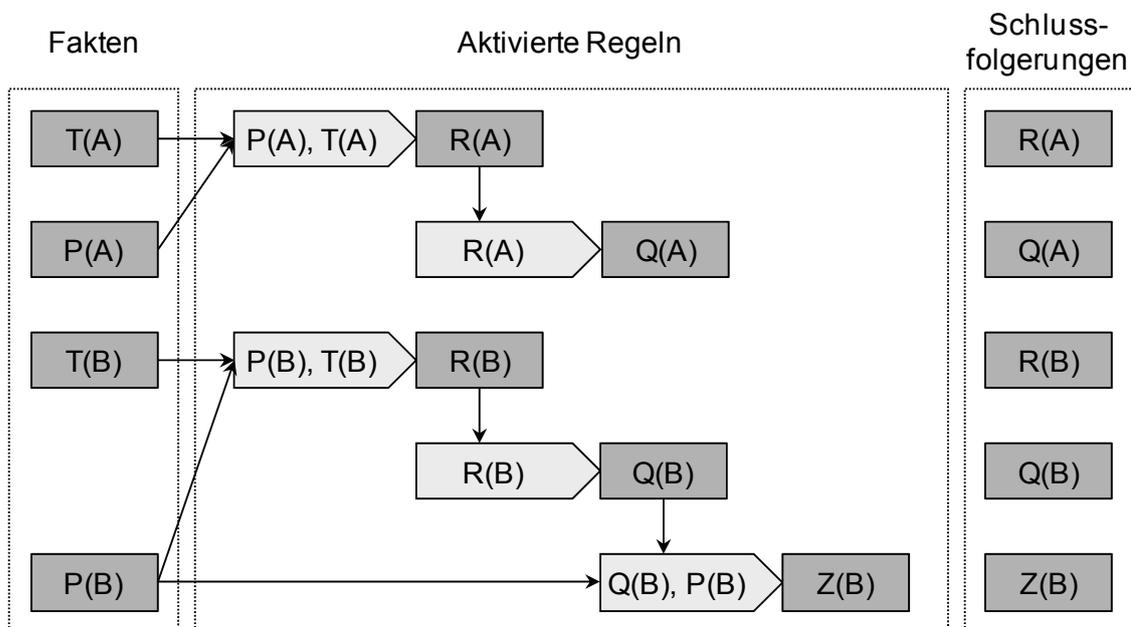
### Objektorientierte Wissensrepräsentation

In regelbasierten Systemen ist die Datenbasis eine unstrukturierte und passive Menge von Fakten (PUPPE 1988). Durch das Nachbilden der menschlichen Assoziationsfähigkeiten soll das entsprechende Wissen mit Hilfe der objektorientierten bzw. framebasierten Wissensrepräsentation strukturiert abgelegt werden (RECHENBERG & POMBERGER 2006). In diesem Zusammenhang wird das Wissen als Menge von Objekten mit spezifischen Eigenschaften und Verknüpfungen untereinander dargestellt (HAUN 2000). Das charakteristische Merkmal ist die Vererbungshierarchie, bei der nur die spezifischen Eigenschaften am Objekt selbst hinterlegt werden. Die allgemeinen Eigenschaften werden den entsprechenden Vorgängern des Objektes in der Hierarchie zugeordnet. Die einzelnen Objekte kommunizieren über Nachrichten mit anderen Objekten (PUPPE 1988, KURBEL 1992). Durch diese Art der Wissensrepräsentation kann von abstrakten Begriffen auf Details bzw. von Details auf abstrakte Begriffe geschlossen werden (RECHENBERG & POMBERGER 2006).

#### 4.3.2.4 Wissensverarbeitung (Inferenz)

Neben der Wissensbasis bildet die Problemlösungskomponente bzw. Inferenzmaschine den zweiten wichtigen Bestandteil eines wissensbasierten Systems (KURBEL 1992). „Die Inferenzmaschine verwendet das Domänenwissen der Wissensbasis und die konkreten Angaben des Benutzers zu einem gestellten Problem, um Schlussfolgerungen zu ziehen und damit neue Fakten zu generieren“ (BODENDORF (2006, S. 157).

Bei regelbasierten Systemen wird zwischen zwei grundlegenden Strategien zum Ziehen von Schlussfolgerungen unterschieden. Bei der *datengetriebenen Inferenz* (*Vorwärtsverkettung*) werden auf Basis der vorliegenden Fakten (z. B. T(A), P(A)) die zugehörigen Regeln in der Wissensbasis gesucht und die entsprechenden Schlussfolgerungen bzw. Konklusionen gezogen (z. B. R(A), Q(A)) (vgl. Abbildung 26). Die hinzugekommenen Fakten bilden u. U. die Grundlage für die Anwendung von weiteren Regeln. Der Vorgang setzt sich solange fort, bis das gewünschte Ziel erreicht ist oder keine neuen Schlussfolgerungen abgeleitet werden können (NEBENDAHL 1987, PUPPE 1988, MERTENS 1990). Anwendung findet die datengetriebene Inferenz in den Fällen, in denen mögliche Zielzustände nicht bekannt sind und durch das Expertensystem ermittelt werden sollen (KURBEL 1992). In diesem Zusammenhang kann der Bereich der Qualitätsprüfung als Beispiel genannt werden.



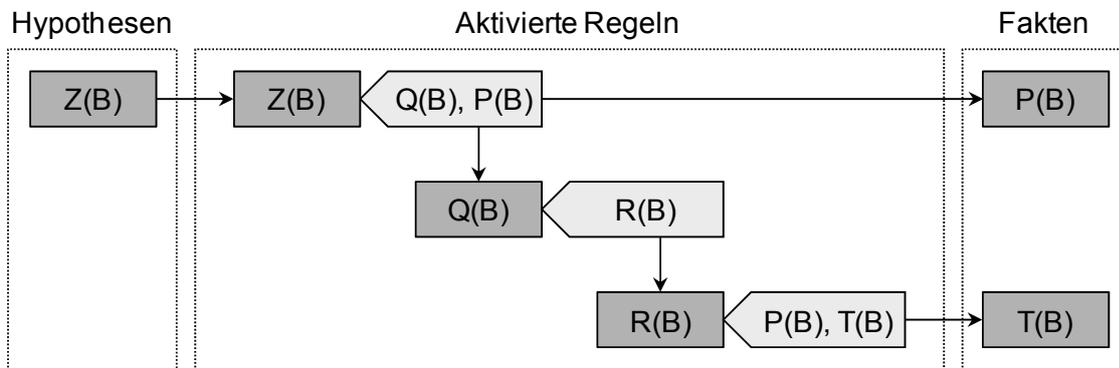
**Legende:**



Abbildung 26: Beispielhafter Ablauf einer datengetriebenen Inferenz (in Anlehnung an SPRECKESEN & SPITZER 2009)

Bei der *zielorientierten Inferenz* bzw. *Rückwärtsverkettung* soll ein vorgegebenes Ziel (Hypothese) (z. B. Z(B)) bestätigt werden. Hierzu durchsucht das System die Regelbasis nach geeigneten Regeln, in deren Schlussfolgerung das Ziel benannt ist (vgl. Abbildung 27). Durch die Anwendung der zutreffenden Regeln wird die Hypothese stufenweise in weitere Unterziele zerlegt, bis eine Aussage

über die Gültigkeit dieser Unterziele getroffen werden kann (PUPPE 1988, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008, SPRECKELSEN & SPITZER 2009).



**Legende:**



Abbildung 27: Beispielhafter Ablauf einer zielorientierten Inferenz (in Anlehnung an SPRECKELSEN & SPITZER 2009)

Mit Hilfe einer Zusammenfassung und Auswertung der Unterziele kann schließlich eine Bewertung des Wahrheitswertes der vorgegebenen Hypothese getroffen werden. Bei der zielorientierten Inferenz werden daher keine Schlussfolgerungen gezogen, sondern die jeweiligen Voraussetzungen überprüft (NEBENDAHL 1987, PUPPE 1988, MERTENS 1990). Diese Art der Problemlösung wird beim Vorliegen bekannter Zielzustände und dem gezielten Erfragen von noch unbekanntem Fakten genutzt (PUPPE 1988, KURBEL 1992). Die Rückwärtsverkettung kann beispielsweise für die Identifikation von Störungsursachen (z. B. bei Maschinenausfällen) verwendet werden.

### 4.3.3 Einsatz von wissensbasierten Systemen zum autonomen Störungsmanagement

Aufbauend auf den Grundlagen des Störungsmanagements sowie den allgemeinen Ausführungen zu wissensbasierten Systemen werden im Folgenden Forschungsarbeiten analysiert, die den Einsatz von Expertensystemen zum Störungsmanagement im Bereich der Produktion zum Ziel hatten.

BURGER (1992) hat in seiner Arbeit ein Konzept zur wissensbasierten Entscheidungsunterstützung für die kurzfristige Auftragsabwicklung in der Fertigung und der Montage vorgestellt. Bei auftretenden Störungen im Produktionsablauf (z. B.

Fehlteile oder Zeitverzögerungen) werden dem Werker<sup>1</sup> mit Hilfe eines Assistenzsystems zustandsbezogene Handlungsvorschläge zur Störungsbehebung bzw. -minimierung aufgezeigt. Der Entscheidungsunterstützungsprozess wird durch einen Soll-/Ist-Vergleich der relevanten Kenngrößen (z. B. Auftragsfortschritt, Materialverfügbarkeit) initiiert, der manuell, ereignis- oder zeitgesteuert angestoßen wird. Mit Hilfe eines regelbasierten Systems werden anschließend prinzipiell mögliche Einzelmaßnahmen abgeleitet und mit einem Simulationsmodell auf die spezifische Anwendbarkeit im vorliegenden Fall geprüft. In einem zweiten Schritt werden die identifizierten Einzelmaßnahmen zu Paketen zusammengefasst (Synthese), welche möglichst erfolgsversprechend sind und die Störungsauswirkungen minimieren sollen. Die Arbeit von BURGER (1992) fokussiert sich insbesondere auf Störungen im Produktionsablauf und somit auf die Gesamtsituation in der Fertigung. Der wissensbasierte Ansatz berücksichtigt Fehlteile und Zeitverzögerungen im Ablauf. Qualitätsbezogene Störungen, die eine Anpassung des Herstellungsprozesses erfordern, werden nicht berücksichtigt.

Ein integrierter Ansatz für ein rechnerunterstütztes Störmanagement in der Produktion wurde von KIM (1995) vorgeschlagen. In diesem Zusammenhang wurde der Schwerpunkt auf die Wissensmodellierung bzw. -repräsentation gesetzt. Hierzu wurden die Aufgabenbereiche *Instandhaltung*, *Qualitätssicherung* und *Umplanung* definiert. Das Erkennen von ressourcenbezogenen Störungen und die Ableitung von möglichen Wartungs-, Inspektions- und Instandsetzungsarbeiten ist Aufgabe der *Instandhaltungsfunktion*. Durch den Aufgabenbereich *Qualitätssicherung* sollen Qualitätsmängel am Produkt erkannt und mögliche Rückschlüsse auf den Produktionsprozess sowie die zugehörigen Maschinen und Anlagen gezogen werden. Unvorhergesehene Ereignisse im Bereich des Auftragsfortschrittes oder von Ressourcenzuständen können u. U. zu einer Anpassung von Produktionsabläufen führen. Die Behandlung von solchen technologischen oder organisatorischen Störungen wird durch den Aufgabenbereich *Umplanung* durchgeführt. Für die spezifizierten Teilbereiche des Störungsmanagementsystems wurden Datenmodelle entwickelt, die sich jeweils aus einer Überwachungs-, Diagnose- und Reaktionskomponente zusammensetzen. Diese bilden die Grundlage für die objektorientierte Wissensrepräsentation, die durch die vier Basisobjektklassen *Auftrag*, *Produkt*, *Prozess* und *Ressource* dargestellt wird. Die Assoziationen zwischen den einzelnen Klassen werden durch semantische Netze modelliert. Der vorgestellte Ansatz wurde von KIM (1995) nur für den Bereich der Instandhaltung prototypisch umgesetzt. Die wissensbasierte Ableitung

---

<sup>1</sup> Aus Gründen der Lesbarkeit wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche personenbezogene Aussagen gelten stets für Frauen und für Männer.

von möglichen zusätzlichen Arbeitsvorgängen (z. B. Nacharbeit) und die anschließende Adaption des Produktionsprozesses wurden nicht betrachtet. Eine weitergehende Integration der Qualitätssicherungskomponente, die einen Rückschluss von fehlerhaften Produkten auf mögliche Maschinenstörungen ermöglichen soll, wird im Ausblick der Arbeit jedoch empfohlen.

LESCHKA (1996) entwickelte ein fallbasiertes System zum Störungsmanagement in flexiblen Fertigungssystemen. Ziel des Systems ist es, auftretende Prozessstörungen durch die Maschinen und Anlagen selbstständig beheben zu können. Als mögliche Störungen werden die Abwesenheit, die Abweichung der Lage oder die Abweichung der Gestalt von Produkten oder Betriebsmitteln betrachtet. Die dem Störungswissen zugrundeliegenden Fälle werden in einer objektorientierten Struktur hinterlegt. Um den Gültigkeitsbereich der Fallbasis auszudehnen, ermöglicht die Fallstruktur die Darstellung sowohl von konkreten als auch abstrakten Fällen. Der erste Fall gilt für genau eine Störungssituation, bei der alle Merkmale vorhanden und vollständig ausgeprägt sind. Bei abstrakten Fällen sind einzelne Attribute nicht vorhanden oder abstrakter ausgeprägt, so dass sie für eine Vielzahl von ähnlichen Störungssituationen gelten. Beim Vorliegen einer Störung wird im fallbasierten System nach einem identischen oder ähnlichen Störungssymptom gesucht und eine entsprechende Aktionsfolge für die Störungsbehebung (z. B. Positionskorrektur) abgeleitet. Durch das entwickelte System zum fallbasierten Störungsmanagement soll u. a. die technische Verfügbarkeit der Maschinen und Anlagen erhöht und die Instandhaltungsabteilung von diagnostischen Routineaufgaben entlastet werden. Der Ansatz von LESCHKA (1996) berücksichtigt insbesondere prozessbezogene Störungen, bei denen auch produktbezogene Größen, wie beispielsweise Lageabweichungen in der Montage, einfließen. Eine möglicherweise notwendige Anpassung des weiteren Fertigungsablaufes aufgrund von Qualitätsmängeln (z. B. zusätzliche Arbeitsvorgänge durch Nacharbeit) wird jedoch nicht betrachtet.

Die bestehende Diskrepanz zwischen dem Informationsbedarf in betrieblichen Planungssystemen nach ungeplanten Ereignissen und den jeweils verfügbaren Informationen in der Produktionsdurchführung sieht HEIDERICH (2001) als Motivation für die Optimierung des Informationsflusses in der technischen Auftragsabwicklung. Die Grundlage hierfür bildet die Identifikation von möglichen, ungeplanten Ereignissen in der Produktionsdurchführung und der entsprechenden Auswirkungen. Darauf aufbauend erfolgt eine Formalisierung der Ereignisbeschreibung. Diese umfasst zum einen eine qualitative Klassifizierung der entsprechenden Merkmale und Merkmalsausprägungen eines ungeplanten Ereignisses und zum anderen die quantitativen Merkmale in Form der zugehörigen Daten. Mit Hilfe eines darauf aufbauenden regelbasierten Systems können die ent-

sprechenden Organisationseinheiten zeitnah über ungeplante Ereignisse benachrichtigt werden. Das Regelwerk ermöglicht mit einem formell unterstützten Informationsfluss die frühzeitige Einleitung von entsprechenden Maßnahmen zur Störungsbehebung. HEIDERICH (2001) betrachtet in seiner Arbeit die ereignisorientierte Informationsverteilung in die entsprechenden Organisationseinheiten. Die wissensbasierte Adaption von Produktionsabläufen wird nicht vertieft.

### 4.3.4 Zwischenfazit

Die im vorhergehenden Abschnitt dargestellten wissenschaftlichen Arbeiten haben gezeigt, dass wissensbasierte Systeme eine vielversprechende Möglichkeit für die effiziente Behandlung von unvorhergesehenen Ereignissen im Produktionsumfeld darstellen. Wie in Abschnitt 4.3.2.3 erläutert, verwendeten die Autoren für den Bereich der Diagnose durchgehend entweder eine regelbasierte oder objektorientierte Wissensrepräsentation. In den diskutierten Arbeiten wurde der Fokus des Störungsmanagements insbesondere auf ressourcen- und prozessbezogene Störungen gelegt. Unzureichende Produktqualitäten wurden nur im Zusammenhang mit den zugehörigen Fertigungsprozessen behandelt. Ein Störungsmanagement zur Adaption von Produktionsabläufen aufgrund von unzureichenden Produktqualitäten ist bisher nicht entwickelt worden.

In einer Studie von CZAJA & VOIGT (2009) wird die Relevanz dieser Thematik allerdings deutlich. Am Beispiel von Wertschöpfungsnetzen in der Automobilindustrie wurde eine unzureichende Erzeugnisqualität bei Teile-, Komponenten- und Modullieferanten als bedeutendste Ursache für Störungen angesehen. In diesem Zusammenhang wurden Qualitätsprobleme insbesondere von Teile- und Komponentenlieferanten als wichtiger Störungsauslöser in der Fertigung genannt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll der Fokus auf das Störungsmanagement bei produktbezogenen Fehlern gelegt werden. Dies umfasst das wissensbasierte Erkennen von Fehlern, die mögliche Ableitung von Nacharbeitsgängen und die anschließende Adaption des Produktionsablaufes.

## 4.4 Modellierung von Produktionsabläufen

### 4.4.1 Allgemeines

Eine wesentliche Prämisse für die adaptive Steuerung von Produktionsabläufen und ein effizientes Störungsmanagement in der Produktion ist die strukturierte und konsistente Abbildung der hierfür benötigten Informationen. Um die zugehö-

rigen Daten interpretieren und nutzen zu können, werden diese meist in entsprechenden Datenmodellen hinterlegt. Ein solches Modell hat einen direkten Bezug zur Realität und soll das zu beschreibende System, mit den für die Aufgabenstellung wichtigen Aspekten, möglichst realitätsnah im Betrachtungsbereich abbilden (WIENDAHL 1996a, WIEDENMANN 2001). Die integrierte Datenhaltung ist somit ein essentieller Bestandteil für eine effiziente Informationsverarbeitung (FELDMANN 1997). Im Produktionsbereich lassen sich die wesentlichen Elemente durch die Kategorien *Produkt*, *Ressource* und *Prozess* abbilden (BRASSLER & SCHNEIDER 2001).

Im Folgenden werden relevante Ansätze zur Modellierung von Produkten diskutiert (Abschnitt 4.4.2). Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 4.4.3 die Vorstellung von Forschungsarbeiten, welche die Entwicklung von durchgängigen Datenmodellen im Bereich der Fertigungs- und Montageplanung sowie im Produktionsbetrieb zum Ziel hatten.

### 4.4.2 Darstellung von produktbezogenen Informationen

Nach DIN 6789 (Teil 2) sind Produktinformationen „*Informationen, die einem bestimmten Produkt (Erzeugnis) zugeordnet sind.*“ Durch die Abbildung von Produktinformationen nach bestimmten Regeln entstehen Produktdaten und Relationen zwischen Produktdaten. Die entsprechenden Informationen, die das Erzeugnis u. a. aus geometrischer und technologischer Sicht spezifizieren, können beispielsweise in Tabellen, technischen Zeichnungen, Stücklisten oder rechnerinternen Modellen hinterlegt werden (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1990). Der unterschiedliche Detaillierungsgrad der jeweiligen Darstellungsform ist mit einem entsprechenden Informationsgehalt der Struktur verbunden (ZÄH et al. 2010).

Wie in Abbildung 28 zu sehen ist, lassen sich Produktinformationen nach DIN 6789 (Teil 2) in technische und kommerzielle Informationen unterteilen (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1990). Die technischen Informationen können weiterhin in technologie-, geometrie- und organisationsbezogene Informationen detailliert werden. Produktinformationen sind nur dann vollständig, wenn technologische, geometrische und organisatorische Daten zu einem entsprechenden Erzeugnis vorliegen. Die rechnerinterne Abbildung dieser Daten wird als *Produktmodell* bezeichnet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die Produktinformationen für die Steuerung von Produktionsabläufen benötigt. Aus diesem Grund werden die kommerziellen Informationen zu einem Produkt, die u. a. Details zu Kostenstrukturen oder Zulieferern enthalten können (EIGNER & STELZER 2009), nicht weiter betrachtet.

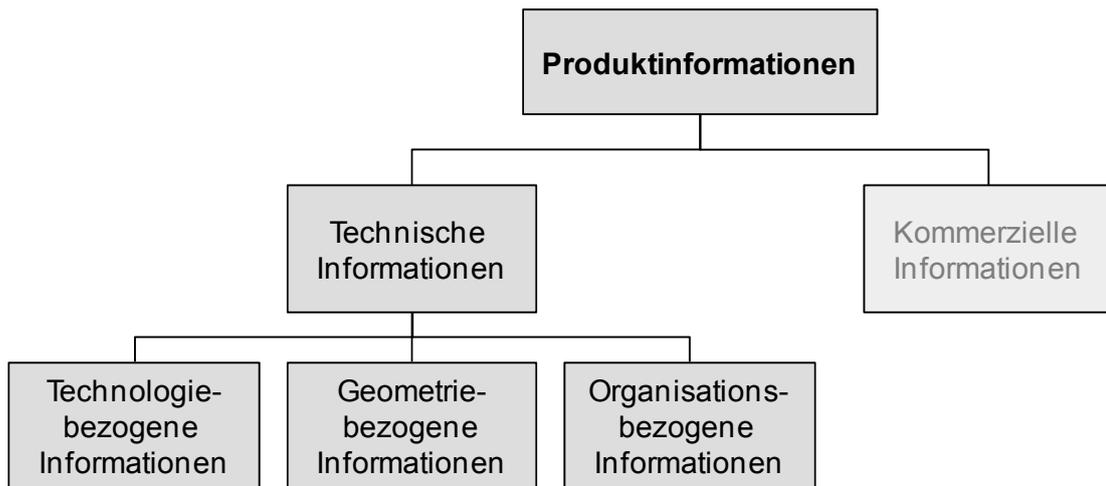


Abbildung 28: Technische Informationen als Untermenge der Produktinformationen (in Anlehnung an DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1990)

Mit Hilfe von STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) wird das Ziel verfolgt, die relevanten Daten aus dem Produktlebenszyklus eines Erzeugnisses strukturiert abzubilden und den Softwaresystemen für die Weiterverarbeitung zur Verfügung zu stellen. STEP ist formal in der Normenreihe ISO 10303 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 1996) definiert und bildet mit dem sogenannten *Integrierten Produktmodell* die Basis für den Produktdatenaustausch, die Produktdatenspeicherung sowie die Produktdatenarchivierung und -transformation. Die Produktdaten können hinsichtlich ihrer Aufgabe in drei Kategorien unterteilt werden. Daten zur *Produktdefinition* beinhalten administrative und organisatorische Angaben zum Produkt, wie beispielsweise die Identifikationsnummer oder die Produktstruktur. Daten zur rechnerinternen Abbildung von Produkten (z. B. Geometriemodelle, Finite-Elemente-Modelle) werden durch die *Produktrepräsentation* beschrieben. Die grafische oder textuelle Ausführung eines Erzeugnisses (z. B. technische Zeichnung, 3D-Geometriemodell) erfolgt durch die *Produktpräsentation* (ANDERL & TRIPPNER 2000).

STEP stützt sich auf einen Methodenkatalog und Baukasten, mit dem spezifische Produktdatenmodelle (Anwendungsprotokolle) beschrieben werden können. Die Grundlage hierfür bilden anwendungsneutrale und anwendungsorientierte Basismodelle. Durch anwendungsneutrale Basismodelle werden Datenmodelle für verschiedene Produktdaten spezifiziert (z. B. Geometrie, Materialeigenschaften), die unabhängig vom Anwendungsfall sind. Ergänzend hierzu konzentrieren sich die anwendungsorientierten Basismodelle auf definierte Einsatzgebiete, wie bei-

spielsweise die Finite-Elemente-Analyse (ANDERL & TRIPPNER 2000, DYLA 2002).

### 4.4.3 Durchgängige Datenmodelle für die Fertigungsplanung und den Produktionsbetrieb

Durch den Anstieg der vorhandenen Informationsmengen und der damit einhergehenden Dynamik sowohl im Bereich der Fertigungs- und Montageplanung als auch im Bereich des Produktionsbetriebes ist der Bedarf nach neuen Konzepten des Informationsmanagements bereits vielfach erkannt worden (z. B. STEINWASSER 1996, KLUBMANN 2009, WEIMER 2010). Um die relevanten Informationen für die jeweiligen Bereiche zielgerichtet bereitstellen und verarbeiten zu können, ist die strukturierte Abbildung der entsprechenden Elemente und die Beschreibung des Beziehungswissens zwischen den Elementen von zentraler Bedeutung (RUDOLF 2007). In diesem Zusammenhang wurde in zahlreichen Forschungsarbeiten eine Vielzahl von Zusammenhängen und Abhängigkeiten zwischen Produkten, Ressourcen bzw. Betriebsmitteln und Prozessen aufgezeigt (z. B. STEINWASSER 1996, FELDMANN 1997, JONAS 2000, RUDOLF 2007). Im Folgenden wird auf relevante Ansätze zur Datenmodellierung aus den Bereichen der Fertigungs- und Montageplanung, der Generierung von Verfahrensketten sowie der Planung und Steuerung von Produktionsabläufen eingegangen.

Als Grundlage für eine integrierte Fertigungs- und Montageplanung haben STEINWASSER (1996), FELDMANN (1997), JONAS (2000) und KLAUKE (2002) Datenmodelle zur Beschreibung von Produkten, Ressourcen und Prozessen entworfen. Am Beispiel der Montage nutzt STEINWASSER (1996) die beschriebene Einteilung zur Erstellung eines Modellkonzeptes, welches Informationen, Abläufe und funktionale Komponenten in der integrierten Produkt- und Prozessplanung auf abstrakter Ebene wiedergibt. Diese Strukturierung dient FELDMANN (1997) als Grundlage für die Entwicklung einer Methode zur durchgängigen rechnergestützten Montageplanung, die eine Parallelisierung von Konstruktions- und Montageplanungsprozessen zum Ziel hat.

JONAS (2000) hat in seiner Arbeit eine Methode für die durchgängige, rechnergestützte Planung von Montageanlagen vorgestellt. Die Grundlage für das daraus abgeleitete Planungssystem stellt ein systemunabhängiges Datenmodell dar, in dem alle Informationen der Montageplanung aufgeführt sind. In Anlehnung an STEINWASSER (1996) und FELDMANN (1997) enthält das Modell die Hauptklassen *Produkt*, *Ressource* und *Vorgang*. Um die Verbindungen von Bauteilen in der Montageplanung abbilden zu können, wurde das Datenmodell zusätzlich um

die Hauptklasse *Verbindungsinformationen* erweitert. Die dort hinterlegten Informationen, wie beispielsweise Schweißpunkte oder Klebenähte, repräsentieren sowohl produkt- (z. B. Geometrieinformationen) als auch prozess- bzw. vorgangsbezogene Daten (z. B. Informationen zur Technologie). Die systemunabhängige Modellierung gewährleistet eine einfache Integration des rechnergestützten Planungsvorgehens in bestehende Systeme über standardisierte Schnittstellen. Durch die Anwendung der Methode konnte JONAS (2000) eine Verkürzung der Produktentwicklungszeit, einen geringeren Planungsaufwand und eine verbesserte Planungsqualität nachweisen.

In Ergänzung zur Arbeit von JONAS (2000) entwickelte KLAUKE (2002) ein Planungssystem zur durchgängigen methodischen Unterstützung bei parallelen und verteilten Prozessen im Bereich der taktischen Produktionsplanung (z. B. Dimensionierung der Produktionsanlagen, Layoutplanung). Die Bereitstellung der hierfür notwendigen Methoden erfolgt durch die sogenannte „Offene Virtuelle Fabrik“ (OVF). Ein wichtiger Bestandteil der OVF ist ein Referenzdatenmodell, dessen Basisklassen sich aus den Elementen *Produkt*, *Ressource* und *Prozess* zusammensetzen. Die relevanten und teilweise gemeinsam genutzten Daten der Produktionsplanung werden dort einmal hinterlegt und den jeweiligen Bereichen mit dem erforderlichen Detaillierungsgrad bereitgestellt. Mögliche Abhängigkeiten der Daten werden durch eine Verknüpfung der Daten im Datenmodell berücksichtigt. Um eine durchgängige Anwendung der OVF im gesamten Produktentstehungsprozess zu gewährleisten, wird die Voraussetzung für die Verknüpfung der Datenverwaltung zu vor-, neben- und nachgelagerten Bereichen der Produktionsplanung, wie der Produktkonstruktion oder dem Produktionsbetrieb, geschaffen. Neben der Montage bezieht KLAUKE (2002) in ihrer Arbeit auch den Karosseriebau und die Komponentenfertigung in die Anforderungsdefinition und die exemplarische Lösungsfindung ein.

Im Bereich der Auswahl und Bewertung von Produktionsverfahren sowie der Generierung von Verfahrensketten haben MORYSON (2004), KNOCHE (2005) und MÜLLER (2008) Modelle zur Beschreibung von Prozessen bzw. zur Abbildung von Wissen über Fertigungsverfahren vorgestellt. In diesem Zusammenhang schlug MORYSON (2004) eine Methode zur systematischen, rechnergestützten Überprüfung und Bewertung von manuell ausgewählten Fertigungsverfahren sowie deren Verknüpfung zu einer Prozesskette vor. Diese Methode gründet auf einer feature-basierten Beschreibung von Produkten. Um einen Vergleich der produktseitigen Anforderungen mit den Prozess- und Betriebsmitteleigenschaften zu ermöglichen (z. B. erzeugbare Formelemente, erreichbare Maß- und Formtoleranzen), werden diese in einer Prozessdatenbank hinterlegt. Die Beschreibung der Prozesskenntnisse erfolgt in Anlehnung an DIN 8580 (Fertigungsverfahren)

(DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003b). Diese Vorarbeiten dienen als Grundlage für eine rechnergestützte Bewertung der Einzelprozesse und der zugehörigen Prozesskette. Nach der manuellen Auswahl der Einzelprozesse und der Erstellung der Prozesskette werden die in der Prozessdatenbank hinterlegten Prozesskenntnisse den jeweiligen Einzelprozessen zugeordnet. Diese Zuordnung ist Voraussetzung für die Bewertung der produktseitig festgelegten Anforderungen mit den Eigenschaften des zugehörigen Prozesses. Im Rahmen der Arbeit von MORYSON (2004) wurden die Gestalt, der Werkstoff, die Oberflächenrauheit sowie die Abmessungen mit den zugehörigen Toleranzen als relevante Merkmale identifiziert. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Überprüfung der Einzelprozesse wird die gesamte Prozesskette auf mögliche Wechselwirkungen untersucht. Zum Abschluss des Verfahrens wird eine Gesamtoptimierung der Prozesskette mit dem Ziel einer Minimierung von Prozessschritten durchgeführt.

KNOCHE (2005) stellt in ihrer Arbeit ein generisches Modell zur Beschreibung von Fertigungstechnologien vor. Ein essentieller Bestandteil des Gesamtmodells ist das Teilmodell zur Technologieklassifizierung, das die verfügbaren Fertigungstechnologien in einen Gesamtkontext einordnet und strukturiert abbildet. Der Aufbau des Teilmodells zur Technologieklassifizierung lehnt sich an die DIN 8580 (Fertigungsverfahren) (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003b) an. Die Auswahl, der Vergleich und die Verkettung von Produktionsprozessen erfordern die feature-basierte Beschreibung von Eingangs- und Ausgangszuständen der zu bearbeitenden Werkstücke, die durch eine Fertigungstechnologie erzeugt werden können. Durch die Definition von vier Teilmodulen können werkstoff-, geometrie- sowie genauigkeits- und toleranzbezogene Eigenschaften detailliert und durch das Modul zur *Spezifikation der Werte für Parameter und Attribute* mit Werten verknüpft werden. Dies ermöglicht die strukturierte Auswahl von möglichen Fertigungstechnologien und Ressourcen für die Bearbeitung von Bauteilen.

Darauf aufbauend hat MÜLLER (2008) ein Modell für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen präsentiert. Das Modell bildet Wissen über die zur Verfügung stehenden Produktionsverfahren ab. In Anlehnung an KNOCHE (2005) orientiert sich auch MÜLLER (2008) hierbei an der DIN 8580 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003b) und den jeweils zugrundeliegenden DIN-Normen. Ergänzend hierzu steht ein Modell zur Abbildung von möglichen Wechselwirkungen sowohl zwischen Produkt und Produktionsverfahren als auch zwischen den einzelnen Verfahren zur Verfügung. Dies erfolgt mit Hilfe einer sogenannten Produkt-Primärverfahren-Matrix bzw. einer Primärverfahren-Primärverfahren-Matrix.

Um eine Zuordnung der Produkte zu den zur Verfügung stehenden Verfahren durchführen zu können, werden übergeordnete Produktklassen definiert. Eine Produktklasse umfasst Erzeugnisse mit gleichen bzw. ähnlichen Ausprägungen hinsichtlich Funktionszweck, Beanspruchung sowie geometrischer und wirkprinziporientierter Ähnlichkeit. Die Produktklassen werden wiederum nach Produktfunktionen, -elementen und -subelementen strukturiert. Die generierten Produktionsalternativen werden abschließend einer technologischen und wirtschaftlichen Bewertung unterzogen.

Als Grundlage für die Planung und Steuerung von Produktionsabläufen haben SONNENSCHNEIN (1998), WIEDENMANN (2001), LI (2001) und PRIESE (2007) jeweils verschiedene Datenmodelle aufgebaut. In diesem Zusammenhang stellte SONNENSCHNEIN (1998) ein Feinplanungssystem für Flexible Fertigungssysteme vor. Als Basis hierfür dient ein Referenzdatenmodell, das die erforderlichen Daten zur Feinplanung in strukturierter Form abbildet. Der Inhalt des Datenmodells, welches in einer Datenbank angelegt wird, besteht aus den Teilelementen *Arbeitsplandaten*, *Auftragsdaten* und *Systemdaten*. Bei den *Arbeitsplandaten* werden ablaufspezifische Stammdaten zur Fertigung eines Werkstückes (z. B. Zuordnung von Arbeitsvorgang zu Maschinengruppe, Reihenfolge der Arbeitsvorgänge, Planzeiten) auftragsneutral hinterlegt. Die entsprechenden organisatorischen Informationen für die Ausführung eines Fertigungsauftrages (z. B. Losgröße, Fertigstellungstermin, Priorität) werden im Element *Auftragsdaten* hinterlegt. Die Stammdaten zu den verfügbaren Maschinen, Arbeitsplätzen und Werkzeugen mit den zugehörigen organisatorischen Informationen (z. B. Schichtmodell) werden durch das Element *Systemdaten* beschrieben. Zu angrenzenden Systemen der Arbeitsplanung, der Produktionsplanung und -steuerung sowie der Ablaufsteuerung werden Schnittstellen durch das Datenmodell bereitgestellt. Aus dem Datenreferenzmodell können farbige Fuzzy-Petri-Netze abgeleitet werden, welche die Grundlage für die Offline-Reihenfolgeplanung und Online-Auftragsauswahl bilden. SONNENSCHNEIN (1998) betrachtet in seinem Ansatz insbesondere Aspekte zur Optimierung der Produktionsplanung. Durch die Berücksichtigung von möglichen Störungen bei der Auftragsauswahl werden die Aufgaben der Produktionssteuerung teilweise betrachtet. Die alternativen Lösungsmöglichkeiten sind allerdings explizit vorgegeben.

Um eine hohe Anpassungsfähigkeit von Planungs- und Steuerungssystemen zu gewährleisten, schlug WIEDENMANN (2001) einen Ansatz für die planungsmethodenunabhängige Modellierung von Produktionsprozessen vor. Das Gesamtmodell, das für die Generierung von Termin- und Kapazitätsplanungssystemen entwickelt wurde, besteht aus vier Teilmodellen. Mit Hilfe des *Zeitmodells* werden die zeitabhängigen Eigenschaften eines Fertigungsprozesses (z. B. Ausfüh-

rungsdauer) beschrieben. Das *Objektmodell* umfasst Artikel (Produkte) und Leistungseinheiten (Ressourcen). Es beschreibt die jeweilige Struktur sowie die planungsspezifischen Eigenschaften der Objekte. Fertigungsfunktionen, planungsspezifische Funktionseigenschaften sowie das termin- und kapazitätsorientierte Funktionsverhalten werden durch das *Funktionsmodell* wiedergegeben. Während innerhalb einer Fertigungsfunktion ein zeitliches und mengenbezogenes Zwangsverhalten vorliegt, existiert zwischen zwei Fertigungsfunktionen eine Steuerungsnotwendigkeit. Die drei genannten Modelle werden schließlich im *Prozessmodell* integriert und zu einem gesamten Fertigungsablauf zusammengeführt. Mit Hilfe des erstellten Gesamtmodells und von zusätzlichen, vordefinierten Bibliotheken mit Planungsfunktionen soll nach WIEDENMANN (2001) das zugehörige Planungssystem automatisch generiert werden können. Die Arbeit fokussiert sich auf die Termin- und Kapazitätsplanung, die im Rahmen der Produktionsplanung durchgeführt wird. Die Aufgaben der Produktionssteuerung, die u. a. die Überwachung sowie eine mögliche Adaption von Fertigungsabläufen vorsieht, werden nicht berücksichtigt.

Für den Bereich der Maschinenebene stellt LI (2001) eine Methode zur rechnergestützten NC-Planung für die Komplettbearbeitung vor. Als Basis hierfür fungiert ein allgemeines Bearbeitungsmodell, das u. a. ein Werkstückmodell, ein Maschinenmodell und ein Prozessmodell umfasst. Das allgemeine Bearbeitungsmodell schafft die Voraussetzung für einen automatisierten Abgleich der durchzuführenden Bearbeitungsschritte mit den zur Verfügung stehenden Fähigkeiten einer Ressource. Mit seiner Arbeit deckt LI (2001) die rechnergestützte NC-Planung für die Dreh- und Fräsbearbeitung auf Maschinenebene ab. Die übergeordnete Ebene der Produktionsplanung und -steuerung wird nicht betrachtet.

PRIESE (2007) hat in Ergänzung zur Arbeit von LI (2001) ein Verfahren für die durchgehende Produktionsplanung unter Nutzung von feature-basierten Arbeitsplänen formuliert. Die Grundlage des resultierenden Produktionsplanungs- und Feinplanungssystems ist ein Informationsmodell, dessen Kern aus einem *Auftrags-*, einem *Bearbeitungs-* und einem *Fähigkeitenmodell* besteht. Das *Auftragsmodell* enthält die organisatorischen Daten einer Bearbeitungsaufgabe aus mengen- und terminorientierter Sicht. Die auftragsunabhängige, feature-basierte Beschreibung von Bearbeitungsschritten wird im *Bearbeitungsmodell* hinterlegt und ermöglicht so die Generierung von ressourcenunabhängigen Arbeitsplänen. Um eine flexible Zuordnung zu Ressourcen zu realisieren, werden die möglichen Bearbeitungsoperationen und herstellbaren Features der zur Verfügung stehenden Ressourcen im *Fähigkeitenmodell* gespeichert. Das Informationsmodell wird durch sogenannte Aktivitätenmodelle ergänzt, die die jeweiligen Vorgänge in der

Produktionsplanung und der Feinplanung beschreiben. PRIESE (2007) setzt den Schwerpunkt seiner Arbeit auf spanende Fertigungsprozesse und berücksichtigt keine Montage-, Qualitäts- und Transportprozesse im Wertschöpfungsprozess. Darüber hinaus ist eine Anpassung des Produktionsablaufes aufgrund einer unzureichenden Produktqualität nicht vorgesehen.

Vor dem Hintergrund der Notwendigkeit kurzer Reaktionszeiten bei der Anpassung von unternehmensspezifischen Prozessen hat WEIMER (2010) ein ganzheitliches Informationsmodell für die durchgängige Datennutzung in der Fabrikplanung und im Fabrikbetrieb vorgeschlagen. Dieses Informationsmodell besteht aus 11 unterschiedlichen Paketen (u. a. Produkt, Ressource, Prozess) und ist Ausgangspunkt für die Ableitung von Unternehmensmodellen. Diese repräsentieren die gemeinsame Datenbasis für Softwarewerkzeuge aus den Bereichen Fabrikplanung und Fabrikbetrieb. Im Rahmen des Fabrikbetriebes wurden u. a. die Bereiche Auftragsmanagement (z. B. Generierung von Produktionsaufträgen), Produktionslogistik (z. B. Dispositionsverfahren, Reihenfolgebildung) und die Abbildung von Betriebsmitteln mit einbezogen. Der Fokus im Fabrikbetrieb liegt somit im Bereich der Fertigungsplanung und weniger in der Überwachung und der Steuerung der Produktion.

### 4.4.4 Zwischenfazit

Der Stand der Forschung und Technik im Bereich der Modellierung von Produktionsabläufen lässt sich in die Bereiche der Fertigungs- und Montageplanung, der Generierung von Verfahrensketten sowie der Planung und Steuerung von Produktionsabläufen unterteilen. In diesen drei Bereichen wurden relevante Ansätze vorgestellt und diskutiert. Es hat sich gezeigt, dass insbesondere im Bereich der Fertigungs- und Montageplanung eine Einteilung der jeweiligen Datenmodelle in die Elemente *Produkt*, *Ressource* und *Prozess* stattgefunden hat. Die entsprechenden Ansätze wurden jedoch nicht im Hinblick auf die spezifischen Anforderungen aus dem Bereich der Produktionsplanung und -steuerung entwickelt. Gleichzeitig wird jedoch die Notwendigkeit eines durchgängigen Datenmodells von der Fertigungsplanung bis zum Produktionsbetrieb gesehen. KLAUKE (2002) schlägt einen solchen Ansatz bereits in ihrer Arbeit vor. WEIMER (2010) nahm diese Anforderung als Grundlage für die Entwicklung eines ganzheitlichen Datenmodells. Allerdings wurde in diesem Fall die Steuerung von Fertigungsabläufen nur am Rande betrachtet.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten zur Auswahl von Produktionsverfahren sowie zur Generierung von Verfahrensketten im Planungsprozess wurde der Fokus jeweils auf die formale Beschreibung von Produktionsverfahren und von Produk-

ten gelegt. In Bezug auf die vorliegende Arbeit ist in diesem Zusammenhang insbesondere die Abbildung von Wissen über Fertigungsverfahren relevant.

Bei der Entwicklung von Datenmodellen für den Bereich der Planung und Steuerung von Produktionsabläufen wurde v. a. die Produktionsplanung (Termin- und Kapazitätsplanung, Belegungsplanung) in den Mittelpunkt gestellt. Die Produktionssteuerung mit der Auftragsüberwachung und der möglichen Adaption von Fertigungsabläufen wurde nur am Rande einbezogen. Darüber hinaus wurde in keinem der untersuchten Ansätze das individuelle Produkt und dessen aktueller Zustand als zusätzliche Größe bei der Steuerung von Produktionsabläufen betrachtet. Aus der Diskussion der vorgestellten Arbeiten ergibt sich der Bedarf, ein Datenmodell für adaptive Produktionssysteme zu entwickeln, bei dem die produktbezogenen Anforderungen und der zugehörige Zustand des Produktes für die Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen berücksichtigt werden.

### **4.5 Handlungsbedarf**

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels wurden die für den Betrachtungsbereich dieser Arbeit relevanten wissenschaftlichen Ansätze untersucht. Basierend auf den in Kapitel 3 definierten Anforderungen wurde der Schwerpunkt auf die adaptive Steuerung von Produktionsabläufen, auf bestehende Verfahren zum autonomen Störungsmanagement und auf die Modellierung von Produktionsabläufen gelegt. Es wurde gezeigt, dass bestehende Ansätze in den drei genannten Teilbereichen eine produktzustandsbezogene Durchführung von Wertschöpfungsprozessen nicht ausreichend unterstützen. Unter Berücksichtigung von bestehenden Forschungsarbeiten wird in den nachfolgenden Kapiteln 5 bis 7 das System zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen entwickelt, welches aus den in Abbildung 29 skizzierten Teilelementen besteht.

In Kapitel 5 wird ein Datenmodell für adaptive Produktionssysteme hergeleitet. Im vorhergehenden Teil der Arbeit wurde gezeigt, dass die Güte der rechnerinternen Abbildung der durchzuführenden Fertigungsaufträge und der zur Verfügung stehenden Ressourcen eine maßgebliche Vorbedingung für die adaptive Steuerung von Produktionsabläufen und für ein effizientes Störungsmanagement ist. Um eine hohe Wiederverwend- und Anpassbarkeit der für die Planung und Steuerung von Arbeitsvorgängen notwendigen Informationen zu erreichen, ist eine formale Beschreibung derselben notwendig. Als Grundlage soll daher in einem ersten Schritt ein Referenzmodell hergeleitet werden, welches sämtliche Daten, die für die Steuerung von Produktionsabläufen relevant sind, strukturiert abbildet. Das entsprechende Modell wird für Produktionssysteme mit einer auf-

tragsbezogenen Fertigung und Montage ausgelegt. Es berücksichtigt das individuelle Produkt als ein zusätzliches Element zur Steuerung der Produktion. Neben der Repräsentation der für die Herstellung eines Auftrages zur Verfügung stehenden Ressourcen soll das Datenmodell den Ausgangspunkt für die Entwicklung einer modularen, bausteinbasierten Beschreibung von Produktionsabläufen bilden. Bezug nehmend auf die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung und Technik (vgl. Abschnitt 4.4) sollen die anerkannten Module *Produkt*, *Ressource* und *Prozess* für das Datenmodell genutzt werden. Eine entsprechende Anpassung an die spezifischen Anforderungen aus dem Bereich der Produktionsplanung und -steuerung ist durchzuführen. Das Ergebnis liefert die Voraussetzung für die logistische Beherrschbarkeit des dynamischen Produktionsablaufes, der durch das Auftreten von produkt- oder ressourcenbezogenen Störungen gekennzeichnet ist.

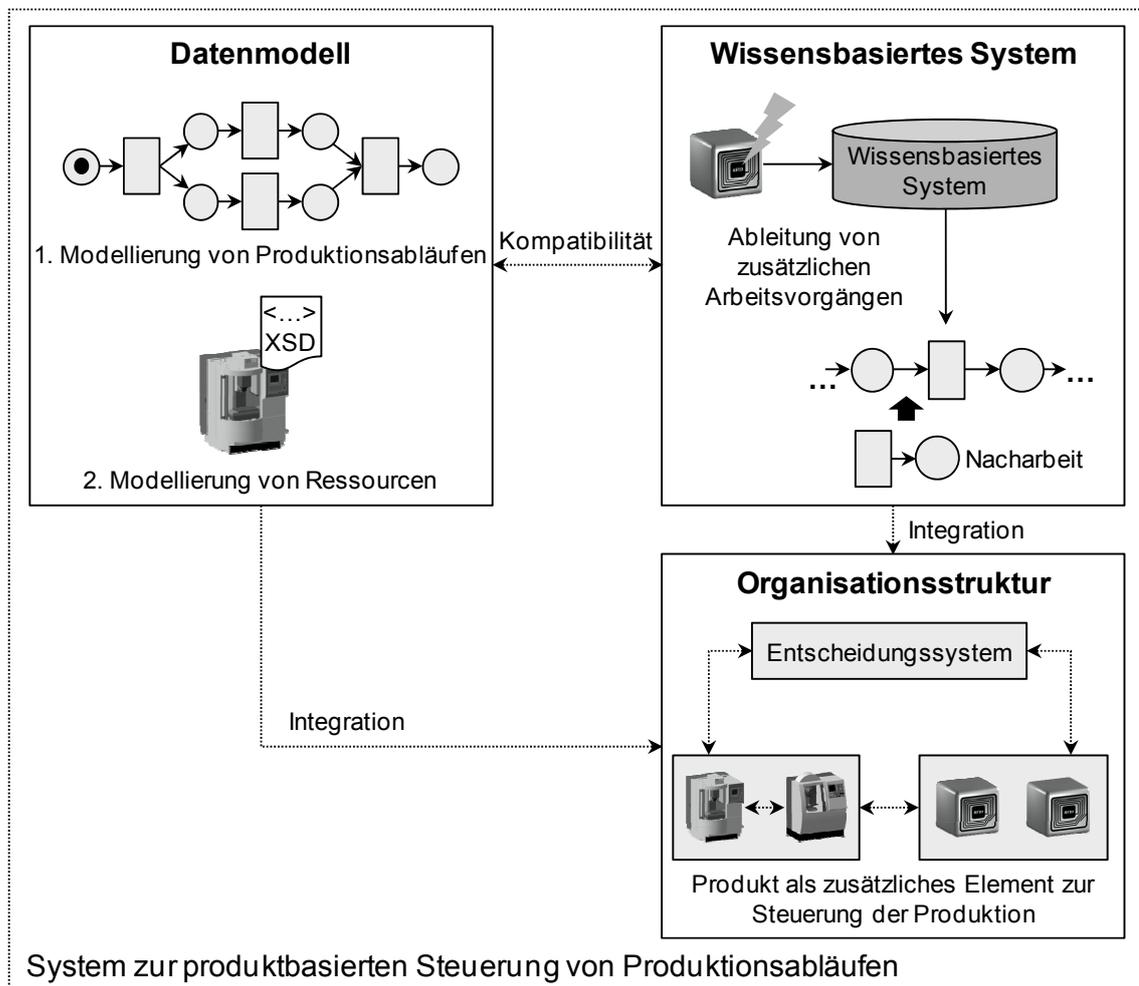


Abbildung 29: Teilelemente des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen

Für den Bereich der technischen Diagnostik wurde gezeigt, dass wissensbasierte Systeme einen vielversprechenden Ansatz für die Identifizierung von Störungen und die Ableitung von geeigneten Handlungsmaßnahmen bieten. In Anlehnung

an die erfolgreiche Handhabung von ressourcen- und prozessbezogenen Störungen ist in Kapitel 6 eine geeignete Wissensrepräsentation und Wissensverarbeitung für die produktzustandsbezogene Steuerung von Produktionsabläufen zu entwickeln. Das wissensbasierte Störungsmanagement soll die Möglichkeit bieten, definierte Produktmerkmale, welche die Beschaffenheit beschreiben, hinsichtlich ihrer Qualität zu untersuchen. Beim Vorliegen eines Werkstückes, das die gegebenen Anforderungen nicht erfüllt, soll das System Lösungen aufzeigen, um den erzeugnisspezifischen Fehler zu beheben. Als Beispiel kann in diesem Zusammenhang ein zusätzlicher Schleifvorgang bei einer unzureichenden Oberflächengüte genannt werden. Die Lösung muss automatisiert in den produktspezifischen Arbeitsplan eingebunden werden. Um eine Integration in das Gesamtsystem zu ermöglichen, ist die Kompatibilität mit der modularen Beschreibung von Produktionsabläufen sicherzustellen (vgl. Kapitel 5).

Neben der Modellierung und strukturierten Verwaltung der für die Auftragsdurchführung und das Störungsmanagement relevanten Informationen ist die Qualität und Reaktionsfähigkeit im Wertschöpfungsprozess von der Organisationsstruktur und den resultierenden Informationsflüssen abhängig. Unter Berücksichtigung des Datenmodells und des wissensbasierten Systems wird in Kapitel 7 eine geeignete Organisationsstruktur erarbeitet, welche die Integration des individuellen Produktes als zusätzliches Element zur Steuerung der Produktion ermöglicht. Bezug nehmend auf die in Kapitel 3 definierte Anforderung hinsichtlich Nutzung anerkannter Technologien und die Ergebnisse aus dem Stand der Forschung und Technik soll die RFID-Technologie als Befähiger für die Realisierung von intelligenten Produkten verwendet werden. Im Gegensatz zu bereits publizierten Arbeiten ist der Schwerpunkt bei der Auslegung der Organisationsstruktur insbesondere auf die dynamische Gestaltung und Ausführung des produktspezifischen Arbeitsplans unter Berücksichtigung des Erzeugniszustandes zu legen. Dies erfordert im Besonderen die echtzeitnahe, produktspezifische Feinplanung an den einzelnen Arbeitsstationen. In Ergänzung hierzu sind Kommunikationsbeziehungen zwischen den einzelnen Arbeitssystemen zur echtzeitnahen Synchronisation von Verzögerungen und Störungen zu realisieren.

## 5 Datenmodell für adaptive Produktionssysteme

### 5.1 Übersicht

Im vorliegenden Kapitel wird ein Datenmodell vorgestellt, welches sämtliche Daten, die für die produktbasierte Steuerung von Produktionsabläufen relevant sind, strukturiert verwaltet. Das Modell beinhaltet zum einen Informationen zu einem Fertigungsauftrag. Dies umfasst die zugehörigen organisatorischen Angaben, verfahrens- und ablaufspezifische Informationen zu den einzelnen Arbeitsvorgängen sowie detaillierte Angaben zum Zustand eines Werkstückes. Diese Informationen werden in einer sogenannten produktindividuellen Prozesskette zusammengefasst (vgl. Abschnitt 5.2). Zum anderen werden die verfügbaren Ressourcen eines Produktionssystems mit den entsprechenden technischen, wirtschaftlichen und organisatorischen Merkmalen spezifiziert (vgl. Abschnitt 5.3).

Das Datenmodell ist somit eine wichtige Grundlage für die geeignete Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Ressourcen und für die produktbasierte Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen. Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung der zuvor genannten Aspekte ist die Entwicklung von standardisierten Datenstrukturen. Diese ermöglichen die effiziente Handhabung, das Verständnis, die Interpretation und die Nutzung der hinterlegten Informationen. Das Ziel bei der Entwicklung des Datenmodells ist zum einen die Erfassung des Informationsbedarfs für die Planung und Steuerung von Produktionsabläufen und zum anderen die strukturierte Abbildung derselben in einem Referenzmodell. *„Ein Referenzmodell ist ein für eine Branche oder einen ganzen Wirtschaftszweig erstelltes Modell, das allgemeingültigen Charakter haben soll. Es dient als Ausgangslösung zur Entwicklung unternehmensspezifischer Modelle“* (KRCMAR 2005, S. 107). Referenzmodelle sind nach KLINGER & WENZEL (2000) durch die folgenden Eigenschaften gekennzeichnet:

- Vorlagencharakter
- Allgemeingültigkeit
- Leichte Verständlichkeit
- Anpassbarkeit
- Modularer Aufbau
- Wiederverwendbarkeit
- Unabhängigkeit von der Implementierungsform

Diese Charakteristika tragen entscheidend dazu bei, dass Referenzmodelle als standardisierte Grundlage für die Einführung und Nutzung in einem Unternehmen verwendet werden können. Durch den Vorlagencharakter und die Anpassbarkeit eines Referenzmodells kann der Prozess der Erstellung und Implementierung einer Ausprägung des Datenmodells beschleunigt und die Qualität des Resultats erhöht werden (KLINGER & WENZEL 2000, DIPPOLD et al. 2005).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit soll der Vorlagencharakter durch einen klar abgegrenzten Objektbereich und eine eindeutige, hierarchische Strukturierung des Datenmodells mit den zugehörigen Elementen erreicht werden. Die hierfür notwendige Allgemeingültigkeit des Modells wird durch einen starken Bezug auf anerkannte Normen, Richtlinien und Definitionen gewährleistet. Hierdurch soll auch ein Beitrag für die einfache Verständlichkeit, Transparenz und Akzeptanz des Datenmodells geleistet werden. Der Forderung nach Anpassbarkeit, einem modularen Aufbau und der Wiederverwendbarkeit wird durch die Grundstruktur der einzelnen Module, den hierarchischen Aufbau und die freie Parametrierung der jeweiligen Elemente nachgekommen. Durch eine kontext- und anwendungsneutrale Darstellung des Datenmodells soll der Anspruch nach Unabhängigkeit von der Implementierungsform erfüllt werden. Das Referenzmodell soll somit bei der betrieblichen Einführung und Nutzung als Grundlage für die Darstellung typischer Datenstrukturen dienen. Gleichzeitig wird jedoch die Flexibilität und Offenheit des Modells für die Ableitung von unternehmensspezifischen Ausprägungen, die zu einer Erweiterung oder Reduzierung des Modells führen können, gewährleistet.

## **5.2 Modellierung von produktindividuellen Prozessketten**

### **5.2.1 Allgemeines**

Eine wichtige Voraussetzung für die Durchführung von Produktionsabläufen ist die Spezifikation der einzelnen Arbeitsvorgänge und ihrer Reihenfolge zur Herstellung eines Einzelteils, einer Baugruppe oder eines Fertigerzeugnisses. Die Beschreibung des Durchlaufes eines Werkstückes vom Rohteil bis zum fertiggestellten Produkt wird durch die Arbeitsplanung erstellt und in einem Arbeitsplan dokumentiert (WIENDAHL 2010). Vor dem Hintergrund der Zielsetzung der Arbeit wird im Rahmen des vorliegenden Abschnittes eine modellhafte, auftragsunabhängige und ressourcenneutrale Beschreibung von Fertigungsabläufen entwickelt.

### 5.2.2 Beschreibung von Bearbeitungsaufgaben

Eine vollständige Beschreibung der Bearbeitungsaufgabe eines Produktionssystems erfolgt durch die Parameter *Technologie*, *Geometrie*, *Zeitwerte* und *Auftragsdaten* (EVERSHEIM 1989, SCHRAFT et al. 1996). Die technologischen Aspekte kennzeichnen den verwendeten Werkstoff mit den relevanten Werkstoffeigenschaften sowie die zu erzielende Oberflächenqualität. Die geplanten Abmessungen des Werkstückes mit den zugehörigen Formelementen sowie den entsprechenden Toleranzen werden unter den geometrischen Größen zusammengefasst. Die Zeitwerte beziehen sich auf die für die Durchführung der Fertigungsaufgabe zur Verfügung stehenden Haupt- und Nebenzeiten sowie die notwendigen Werkzeugstandzeiten. Durch die auftragsbezogenen Größen werden u. a. die zu produzierenden Stückzahlen und die zugehörigen Losgrößen spezifiziert. Aus diesen Informationen lassen sich die technisch möglichen und wirtschaftlich sinnvollen Bearbeitungsverfahren und -folgen ableiten. Der eigentliche Vorgang der Arbeitsplanerstellung mit der Auswahl der Fertigungsverfahren erfolgt durch die Arbeitsplanung und wird an dieser Stelle nicht weiter betrachtet. Dies gilt ebenso für die Rüstzeiten, die aufgrund der auftragsunabhängigen und ressourcenneutralen Darstellung von Arbeitsvorgängen in diesem Zusammenhang nicht berücksichtigt werden. Die auftragsbezogenen Informationen im o. g. Kontext werden für die Produktionsplanung benötigt. Sie sind für die Steuerung von Produktionsabläufen in der auftragsbezogenen Produktion nicht relevant und werden aus diesem Grund im Folgenden nicht betrachtet.

Die Parameter *Technologie*, *Geometrie* und *Zeitwerte* bilden im weiteren Verlauf der Arbeit die Grundlage für die Definition der Anforderungen eines Produktionsauftrages an die zur Verfügung stehenden Maschinen und Anlagen. Im Rahmen der Auftragsfreigabe soll ein Abgleich der produkt- und prozessspezifischen Anforderungen mit den ressourcenspezifischen Fähigkeiten stattfinden (vgl. Kapitel 7). In diesem Zusammenhang muss die technische Beschreibung einer Bearbeitungsaufgabe noch durch zusätzliche organisationsbezogene (z. B. Auftrags-Nr., Liefertermin) und betriebsmittelorientierte Informationen (z. B. Verfahrensart) mit den zugehörigen Bearbeitungsdaten (z. B. NC-Programm, Montagevorranggraph) ergänzt werden. Die Elemente zur vollständigen Beschreibung einer Bearbeitungsaufgabe sind in Abbildung 30 zusammenfasst.

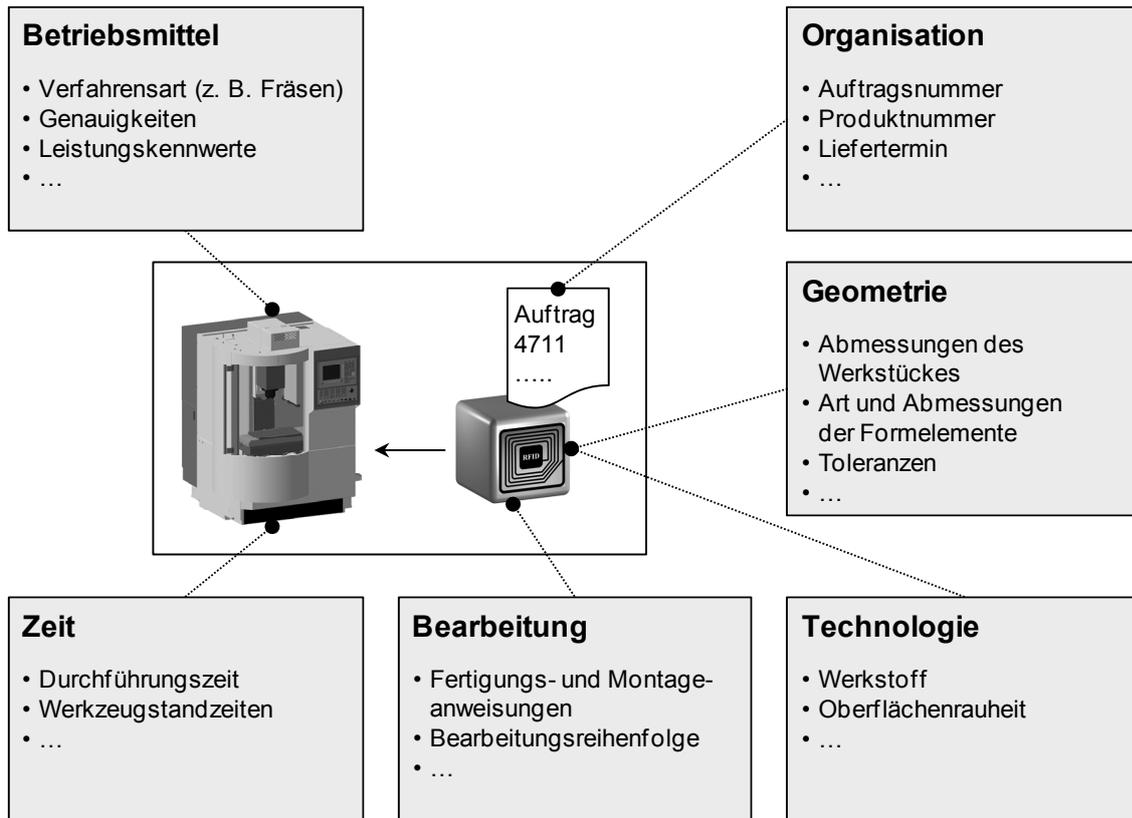


Abbildung 30: Bestandteile zur vollständigen Beschreibung einer Bearbeitungsaufgabe (in Anlehnung an EVERSHEIM 1989)

Aus den oben genannten Überlegungen ergibt sich, dass für die Beschreibung von Bearbeitungsaufgaben insbesondere Informationen zum Produkt und zu den benötigten Fertigungsverfahren relevant sind. In diesem Zusammenhang hat die Untersuchung von Forschungsarbeiten im Bereich der Modellierung von Produktionsabläufen (vgl. Abschnitt 4.4 ab Seite 71) gezeigt, dass eine Einteilung in die Module *Produkt*, *Ressource* und *Prozess* bei Datenmodellen im Bereich der Fertigungsplanung und des Produktionsbetriebes anerkannt ist. In Anlehnung an die betrachteten Arbeiten wird das Datenmodell für die Modellierung von produktindividuellen Prozessketten in die Module *Produkt* (z. B. organisationsbezogene Informationen, geometrische Form) (vgl. Abschnitt 5.2.3) und *Prozess* (z. B. Fertigungs- und Montageanweisungen) (vgl. Abschnitt 5.2.4) unterteilt. Die Abbildung von ressourcenbezogenen Informationen wird in Abschnitt 5.3 beschrieben. Zur effizienten Abbildung der Planungs- und Steuerungsinformationen wird im Datenmodell eine hierarchische Struktur genutzt, welche die Elemente logisch gliedert. Durch diese Module können die Inhalte für die produktbasierte Steuerung von Produktionsabläufen vollständig abgebildet werden.

### 5.2.3 Abbildung von Produkten und Zuständen von Werkstücken

In der Fertigung wie auch im Verlauf der Montage soll der Zustand des Werkstückes als führendes Steuerungskriterium genutzt werden. Die hierfür erforderlichen Produktinformationen stellen nach DIN 6789-2 Informationen dar, die einem bestimmten Produkt (Erzeugnis) zugeordnet sind (vgl. Abschnitt 4.4.2 ab Seite 72) (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1990). Die Hinterlegung des eigentlichen Zustandes des Werkstückes kann auf unterschiedlichen Detailebenen und je nach Anforderung des Anwenders erfolgen (ZÄH et al. 2010). Im Rahmen dieser Arbeit fasst das Produktmodul sämtliche Informationen zusammen, die das Werkstück in seiner geometrischen Form und Dimensionierung sowie den zugehörigen technologiebezogenen Eigenschaften beschreiben. Ergänzend hierzu werden die für die Herstellung eines Produktes notwendigen organisatorischen Informationen (z. B. Auftrags-Nr.) sowie ggf. die Erzeugnisstruktur mit den Einzelteilen dem Produktmodul zugeordnet.

In Anlehnung an die DIN 6789-2 werden die Informationen im Produktmodul daher in organisations-, technologie-, geometrie- und strukturbezogene Informationen detailliert (vgl. Abbildung 31). Die einzelnen Bereiche sind in einer Baumstruktur jeweils weiter untergliedert. Die Angaben beziehen sich immer auf den aktuellen Fertigungs- und Montagezustand des Erzeugnisses. Der Produktzustand beschreibt in einer Momentaufnahme den aktuellen Produktionsfortschritt eines Werkstückes mit den zugehörigen Eigenschaften und den entsprechenden Parametern. Das Ergebnis des Wertschöpfungsprozesses ist das fertiggestellte Produkt. Es zeigt ein technisches Gebilde, das sich aus verschiedenen Gruppen und Einzelteilen zusammensetzt. Da die Ressourcenauswahl auf Arbeitsvorgangsebene und nicht auf Prozessebene bzw. Arbeitsgangebene stattfindet, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine STEP-basierte Produktrepräsentation gewählt.

Die genannten Produktinformationen beziehen sich zunächst auf die Einzelteile eines Produktes. Bei den *organisationsbezogenen Informationen* wird zwischen *auftragsbezogenen Informationen* (z. B. Produkt-Nr., Auftrags-Nr.) sowie *ablaufbezogenen Informationen* (z. B. Liefertermin) unterschieden.

Als Voraussetzung für die geeignete Zuordnung von einzelnen Arbeitsvorgängen zu Ressourcen und die Beurteilung des Produktzustandes sind neben den organisationsbezogenen Informationen auch technologie- und geometriebezogene Informationen von wesentlicher Bedeutung. Diese Informationen dienen als Schnittstelle zum Prozessmodul, in dem die produktrelevanten Daten für die notwendigen Bearbeitungsoperationen hinterlegt werden. Durch die *technologie-*

bezogenen Informationen werden detaillierte Angaben zum Werkstückmaterial mit relevanten Werkstoffeigenschaften (z. B. Härte) und zur Oberflächenqualität gemacht.

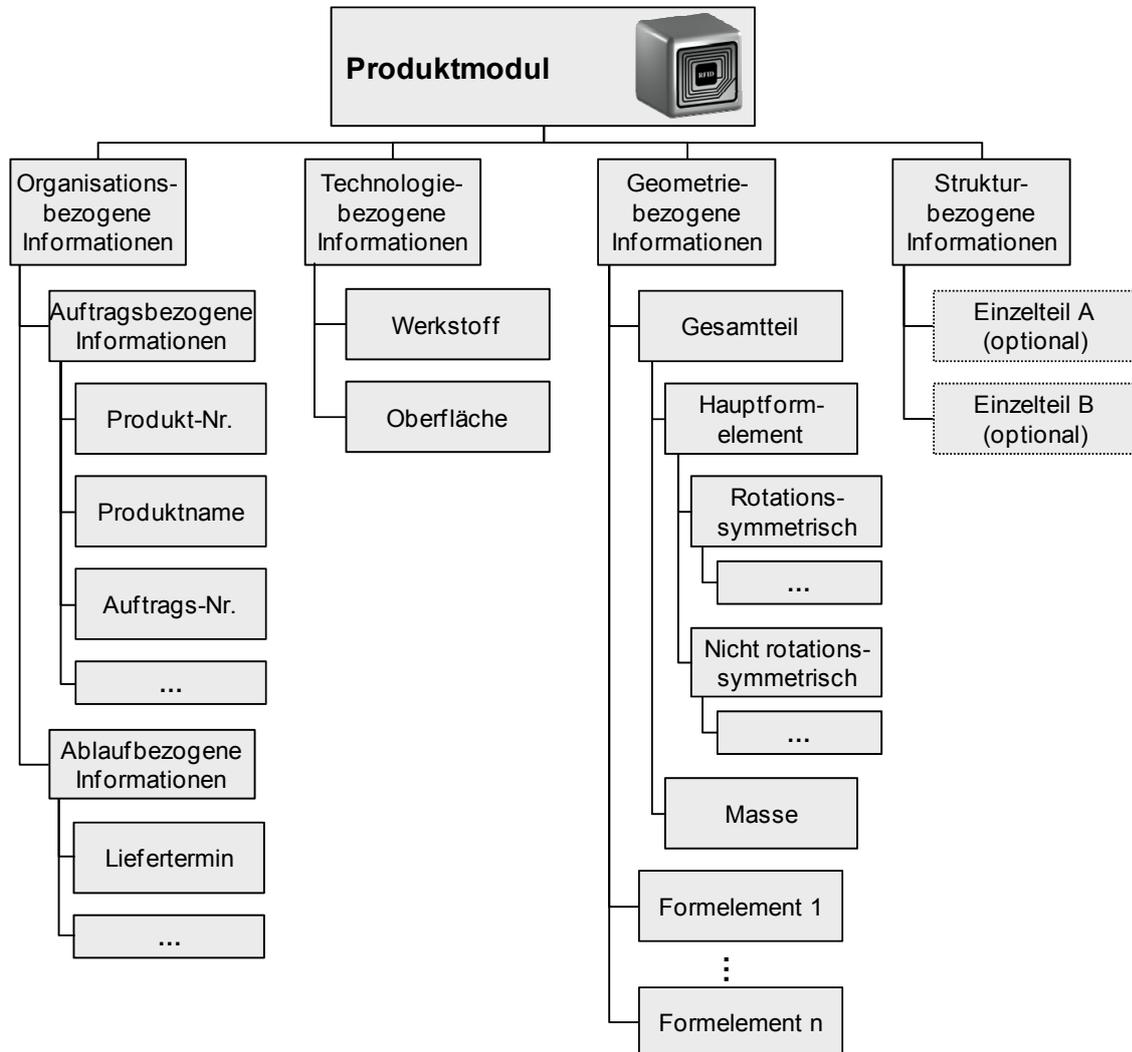


Abbildung 31: Referenzinformationsstruktur für die Beschreibung von Produkten

Die Beschreibung der *geometrischen Form und der Abmessungen* des Produktes mit den zugehörigen Toleranzen ist sowohl für die entsprechende Auswahl von Fertigungs- und Montageressourcen (vgl. Kapitel 7) als auch für die Beurteilung der Produktqualität beim autonomen Störungsmanagement erforderlich (vgl. Kapitel 6). In Anlehnung an KNOCHE (2005) wird die Gestalt des Werkstückes durch eine mehrstufige Klassifizierung mit Hilfe von standardisierten Hauptformelementen beschrieben. Dies ermöglicht die geometrische Spezifizierung des gesamten Erzeugnisses sowie die eindeutige und unabhängige Darstellung von Formelementen (z. B. Bohrung) mit den entsprechenden geometrischen Daten. Gemäß der vorgeschlagenen Klassifizierung werden Hauptformelemente in der ersten Ebene in rotations-symmetrische und nicht rotations-symmetrische Kör-

per unterteilt. In der nachfolgenden Ebene erfolgt eine Unterscheidung hinsichtlich der Grundform des Werkstückes bzw. eines zugehörigen Teilelementes, wie beispielsweise Zylinderform oder Quader (vgl. Abbildung 32). Nach der allgemeinen Spezifizierung der Grundform werden auf der untersten Beschreibungsebene die detaillierten Maße und Toleranzen festgelegt.

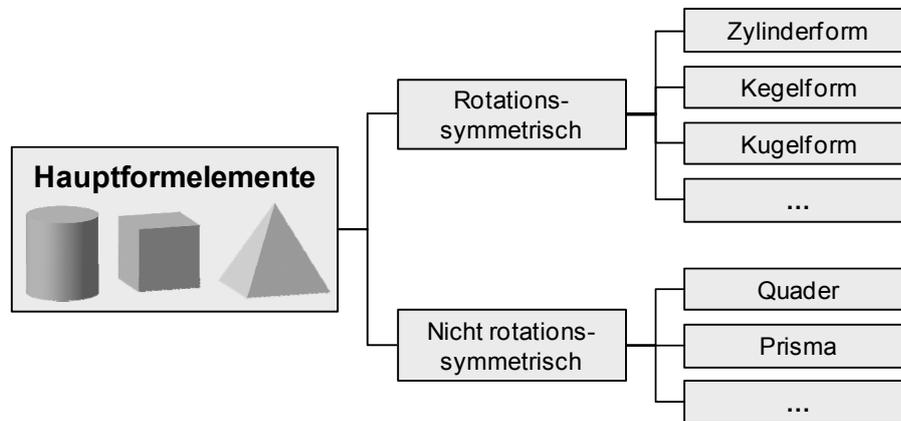


Abbildung 32: Beschreibung von Hauptformelementen (in Anlehnung an KNOCHE 2005)

Das Produkt und die zugehörigen Formelemente sind durch definierte Abmessungen und durch eine geometrische Gestalt gekennzeichnet. Durch fertigungstechnische Prozessstreuungen oder verschleißbedingte Einflüsse (z. B. Werkzeugverschleiß) kann es im Herstellungsprozess zu Abweichungen von den Sollmaßen oder den geometrischen Eigenschaften (z. B. Form, Lage) kommen. Um produktbezogene Fehler erkennen und eine Fehleranalyse durchführen zu können, müssen die zulässigen Abweichungen vom Normmaß beschrieben werden. In diesem Zusammenhang wird zwischen Form-, Lage- und Maßtoleranzen unterschieden. Bei den Maßtoleranzen werden nach DIN EN ISO 286-1 beispielsweise Angaben zu Grenzabmaßen und Passungen gemacht (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2010). Die Form- und Lagetoleranzen werden nach DIN EN ISO 1101 spezifiziert und umfassen u. a. Angaben zur Geradheit, Ebenheit, Rundheit und Parallelität (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2008).

#### 5.2.4 Abbildung von Prozessen

Eine wichtige Grundlage für den Herstellungsprozess ist der auf Basis der Produktkonfiguration zu erstellende Arbeitsplan mit den zugehörigen Fertigungs- und Montageumfängen. Mit Hilfe eines Prozessmoduls sollen die einzelnen Arbeitsvorgänge, die zur Herstellung eines Produktes notwendig sind, abgeleitet

werden. Das Prozessmodul umfasst sowohl die direkt (z. B. Fräsprozess) als auch die indirekt (z. B. Qualitätsprüfung) an der Wertschöpfung beteiligten Prozesse.

Gemäß den Anforderungen aus Kapitel 3 ist eine bedarfsgerechte Zuordnung der einzelnen Arbeitsvorgänge zu Ressourcen mit den entsprechenden Fähigkeiten sicherzustellen. Dies erfordert einen Abgleich der produkt- und prozessspezifischen Anforderungen mit den funktionalen Fähigkeiten der zur Verfügung stehenden Ressourcen (vgl. Abschnitt 5.3). Um dies zu erreichen, müssen die einzelnen Arbeitsvorgänge zunächst auftragsunabhängig und ressourcenneutral beschrieben werden. Die Spezifikation der einzelnen Operationen erfolgt daher, ähnlich wie bei STEINWASSER (1996), ausschließlich aus Sicht der Technologie und nicht aus Sicht einer konkreten Fertigungsaufgabe oder der eingesetzten Ressource. Eine spezifische Zuweisung von Arbeitsvorgängen zu Aufträgen und Ressourcen wird erst im Rahmen der Auftragsfreigabe vollzogen (vgl. Kapitel 7).

Als Grundlage für eine formale Beschreibung von Arbeitsvorgängen dient eine Einteilung der Operationen anhand verfahrenstypischer Charakteristika. In diesem Zusammenhang erfolgt die Darstellung des Arbeitsvorganges in einer stufenweisen Detaillierung. Die grundlegende Definition der Verfahrensart basiert auf der VDI-RICHTLINIE 2815 (1978) (vgl. Abschnitt 5.3). Diese Einteilung erlaubt jedoch keine detaillierten Rückschlüsse über die durchzuführenden Fertigungsverfahren. Aufgrund der hohen Akzeptanz und des Bekanntheitsgrades wird die DIN 8580 (Fertigungsverfahren) (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003b) als Grundlage für die Klassifizierung und die detaillierte Beschreibung von Fertigungs- und Montageprozessen genommen. Unter Berücksichtigung von weiteren zugrundeliegenden Normen, wie beispielsweise der DIN 8589 (Spanen), DIN 8590 (Abtragen) und DIN 8593 (Fügen) (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003a, 2003d, 2003c), ist eine formale Beschreibung der prozessbezogenen Anforderungen bis auf die Werkzeugebene (z. B. Gewindedrehen – DIN 8589-1, Umfangs-Planfräsen – DIN 8589-3 (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003a) möglich (vgl. Abbildung 33). Die hierarchische Darstellung der elementaren Fertigungsverfahren wird auf der untersten Detaillierungsebene durch die Angabe der für die Durchführung eines Arbeitsvorganges benötigten Werkzeuge ergänzt.

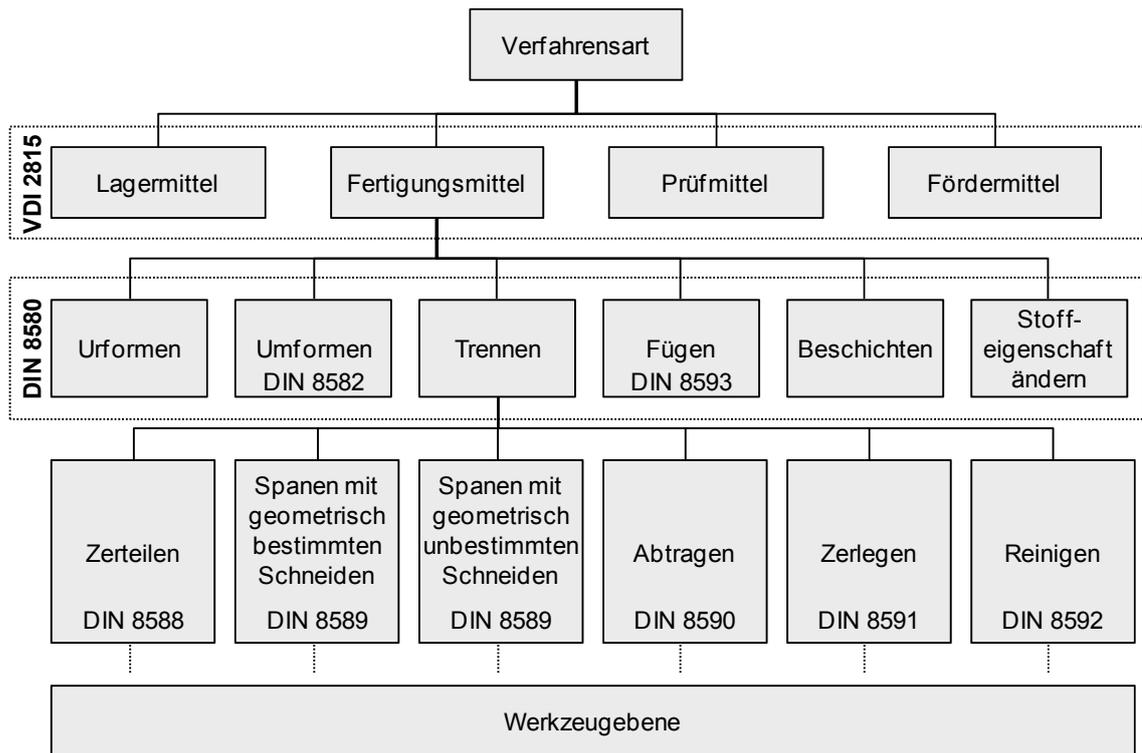


Abbildung 33: Strukturierte Einteilung von Verfahrensarten am Beispiel „Trennen“

Neben der Verfahrensart werden für die vollständige Spezifizierung eines Arbeitsvorganges weitere Informationen benötigt. In Anlehnung an die Strukturierung von Produktionsverfahren bei MÜLLER (2008) werden in der Referenzinformationsstruktur auf der obersten Gliederungsebene zusätzlich die folgenden Elemente hinterlegt (Abbildung 34):

- Bearbeitungsdaten
- Betriebsmittelorientierte Informationen
- Technische Informationen
- Dokumentation

Das Element *Bearbeitungsdaten* enthält die fertigungs- und montagerelevanten Daten (z. B. NC-Programm, Montagevorranggraph), die für die Durchführung eines Arbeitsvorganges notwendig sind.

Im Element *betriebsmittelorientierte Informationen* werden auftragsbezogene Angaben hinsichtlich möglicher Maschinenzuordnungen und die zugehörigen Plan-Durchführungszeiten für den Arbeitsvorgang hinterlegt. Die zustandsbezogene Zuordnung von Ressourcen wird im Rahmen der Auftragsfreigabe durchgeführt. Die Plan-Durchführungszeit setzt sich aus den Bearbeitungszeiten

und den durchschnittlichen, ressourcenbezogenen Rüstzeiten zusammen (vgl. Kapitel 7).

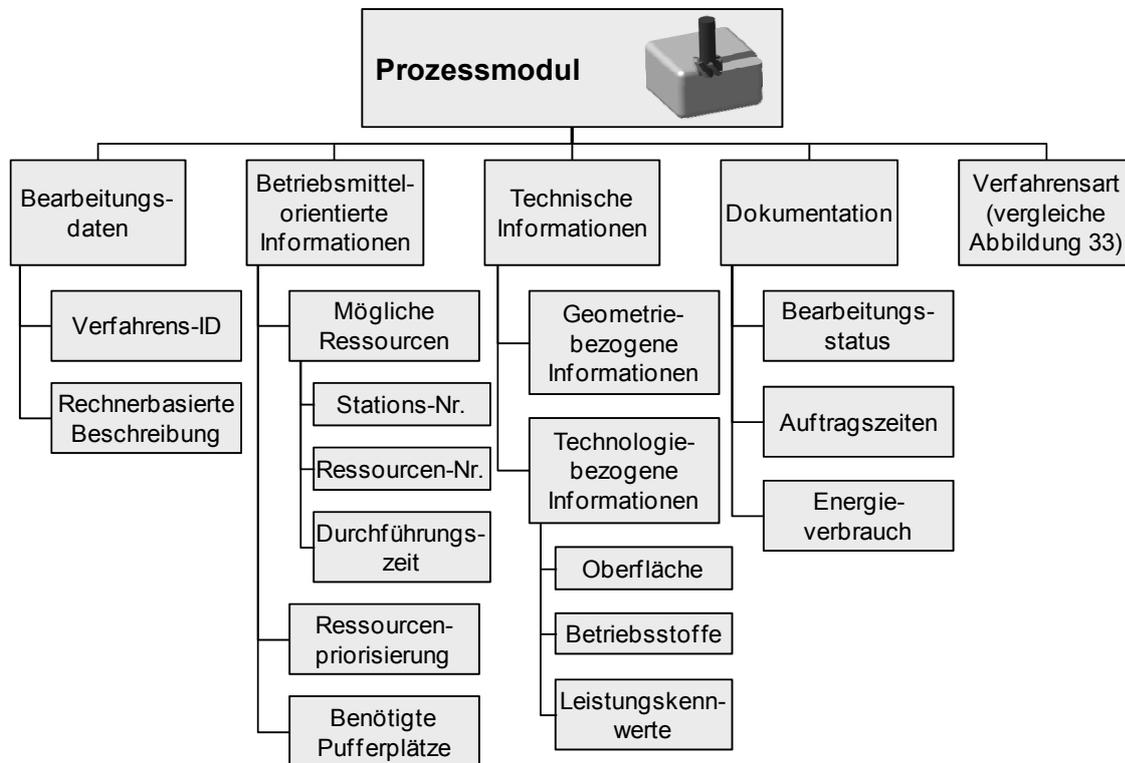


Abbildung 34: Referenzinformationsstruktur für die Darstellung von Prozessen

Einen wichtigen Beitrag zur Auswahl einer geeigneten Ressource leistet das Element *technische Informationen*. Die in diesem Element hinterlegten Informationen bilden die Anforderungen des Prozesses hinsichtlich zu erreichender Form-, Lage- und Maßtoleranzen sowie der Oberflächenqualität (z. B. Oberflächenrauheit) ab. Diese Angaben repräsentieren somit gleichzeitig den erwarteten Zustand des Werkstückes nach dem erfolgreichen Abschluss eines Arbeitsvorganges. Wie bei der Darstellung des aktuellen Produktzustandes im Produktmodul werden die Maßtoleranzen im Prozessmodul nach DIN EN ISO 286-1 angegeben (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2010). Die Form- und Lagetoleranzen werden nach DIN EN ISO 1101 spezifiziert (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2008) und können sich sowohl auf das gesamte Werkstück als auch auf einzelne Formelemente beziehen, die im Rahmen des Arbeitsvorganges bearbeitet werden. Die technologiebezogenen Informationen werden ergänzt durch notwendige Leistungskennwerte, die im Rahmen der Prozessdurchführung erreicht werden müssen, wie beispielsweise die Vorschubleistung oder die Bearbeitungsgeschwindigkeiten.

Die zuvor genannten Elemente der Referenzinformationsstruktur werden zusätzlich durch das Element *Dokumentation* ergänzt. In diesem Bereich werden In-

formationen, die bei der Durchführung eines Arbeitsvorganges entstehen (z. B. Bearbeitungsstatus, Auftragszeiten, Energieverbrauch) hinterlegt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine hierarchische Untergliederung der Auftragszeit mit den zugehörigen Haupt- und Nebenzeiten nach REFA gewählt (VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION (REFA) 1993). In einem nachgelagerten Prozess können die Informationen beispielsweise für eine Analyse und mögliche Optimierung von Abläufen genutzt werden (ZAEH et al. 2012). Dieser Aspekt wird im Rahmen der Arbeit nicht weiter vertieft.

Mit Hilfe der Referenzinformationsstruktur im Prozessmodul können die wesentlichen Informationen, die für die Beschreibung und Durchführung eines Arbeitsvorganges erforderlich sind, abgebildet werden. Im Rahmen der Auftragsdurchführung wird die auftragsunabhängige und ressourcenneutrale Beschreibung mit spezifischen Parametern zum Auftrag sowie mit den für die Bearbeitung notwendigen Maschinen und Anlagen angereichert. Die Prozessbeschreibung bildet zusammen mit der Beschreibung des aktuellen Produktzustandes die Grundlage für die Auswahl einer geeigneten Bearbeitungsressource.

### **5.2.5 Modularisierung von Produktionsabläufen**

In Kapitel 3 wurde u. a. die Anforderung formuliert, dass die logistische Beherrschbarkeit des Produktionsablaufes auch beim Auftreten von produkt- oder ressourcenbezogenen Störungen sowie wechselnden Auftrags- und Fertigungssituationen gewährleistet sein muss. Zur Erreichung der hierfür notwendigen hohen Flexibilität und der kurzen Reaktionszeiten wurde in verschiedenen Forschungsarbeiten eine Modularisierung von Prozessabläufen als ein viel versprechender Lösungsansatz identifiziert (GECK-MÜGGE & WIEDENMANN 1993, WIEDENMANN 2001, GRUNWALD 2002, MÜLLER 2008).

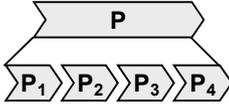
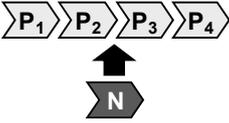
Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Produktionsablauf daher als Folge von Einzelprozessen bzw. Arbeitsvorgängen beschrieben, die mit Hilfe von Prozessbausteinen dargestellt werden. Ein Prozessbaustein repräsentiert die kleinste Einheit eines Prozesses mit Steuerungsnotwendigkeit. Nach GECK-MÜGGE & WIEDENMANN (1993) liegt eine Steuerungsnotwendigkeit vor, wenn eine Zwangsverketzung zwischen den einzelnen Prozessschritten fehlt. Innerhalb eines Prozessbausteins wird per Definition eine Zwangssteuerung durchgeführt. Ein kompletter Fertigungsablauf ergibt sich durch die Verknüpfung der einzelnen Prozessbausteine zu einer sogenannten produktindividuellen Prozesskette (vgl. Abschnitt 5.2.7).

Die Generierung von Prozessbausteinen ist somit ein Befähiger für die Erreichung einer prozessorientierten Planung, Steuerung und Überwachung von Produktionsabläufen. In diesem Zusammenhang soll in erster Linie der Herstellungsprozess eines Erzeugnisses beschrieben werden. Gleichzeitig wird eine frühzeitige Referenzierung auf konkrete Ressourcen und Aufträge vermieden. Die entsprechende Zuweisung und Detaillierung wird erst im Rahmen der Freigabe eines spezifischen Auftrages durchgeführt. Durch die modulare, bausteinbasierte Beschreibung soll die Grundlage für die Handhabbarkeit der vorhandenen Komplexität geschaffen werden. Wie in Abschnitt 1.2 (ab Seite 3) erläutert, ist die Komplexität in einer auftragsbezogenen Produktion insbesondere durch mögliche Freiheitsgrade bei der Maschinenbelegung und der Arbeitsvorgangsreihenfolge gekennzeichnet. Darüber hinaus soll eine autonome Bearbeitung von Einzelprozessen gewährleistet sein, damit mögliche Änderungen bzw. Erweiterungen im Fertigungsablauf, die durch modifizierte (z. B. Ressourcenänderung) oder zusätzliche Arbeitsvorgänge (z. B. Nacharbeit) charakterisiert sind, ermöglicht werden.

Mit Hilfe der in den Prozessbausteinen hinterlegten Informationen soll eine automatisierte Steuerung von Produktionsabläufen erreicht werden. Das bedeutet, dass die notwendigen Informationen für die technische Beschreibung einer Bearbeitungsaufgabe, die Spezifizierung des aktuellen Produktzustandes sowie die für die Auftragsdurchführung erforderlichen organisatorischen Informationen strukturiert in den Prozessbausteinen hinterlegt werden müssen. Zur Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit und einer aufwandsarmen Integration in Fertigungsumgebungen muss sowohl die Struktur der einzelnen Bausteine als auch der Aufbau der gesamten produktindividuellen Prozesskette standardisiert werden. Die charakteristischen Eigenschaften einer modularen, bausteinbasierten Beschreibung von Produktionsabläufen sind in Abbildung 35 zusammengefasst.

Als Grundlage für die Definition der Prozessbausteine dienen die in den Abschnitten 5.2.3 und 5.2.4 hergeleiteten Produkt- und Prozessmodule. Im Produktmodul sind sämtliche technologie- und geometriebezogenen Informationen zum einzelnen Werkstück hinterlegt. Darüber hinaus werden im Produktmodul die notwendigen organisatorischen Informationen für die Auftragsdurchführung spezifiziert. Die technischen Informationen für die Ausführung eines Arbeitsvorganges werden durch das Prozessmodul zur Verfügung gestellt. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Informationen, die für die Realisierung eines Arbeitsauftrages erforderlich sind, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit spezifische Ausprägungen der Prozessbausteine abgeleitet. Dies erlaubt die getrennte Abbildung von organisationsbezogenen (z. B. Liefertermin), arbeitsvorgangs-

bezogenen (z. B. Bearbeitungsdaten) sowie dokumentationsbezogenen Informationen (z. B. Zustand des Produktes).

Eigenschaft	Symbolik*	Beschreibung
Modularisierung/ Abgrenzbarkeit		Produktionsablauf als Folge von Arbeitsvorgängen bzw. Prozessbausteinen
Standardisierbarkeit		Verwendung von standardisierten Bausteintypen und -strukturen
Kombinierbarkeit		Aufwandsame Konfiguration von Produktionsabläufen
Erweiterbarkeit		Bedarfsorientierte Anpassung bzw. Erweiterung von Produktionsabläufen
Prozessstabilität		Veränderungen bleiben auf einzelne Arbeitsvorgänge beschränkt

\* Die einzelnen Ausprägungen der Prozessbausteine werden in den Abschnitten 5.2.6 und 6.3 detailliert erläutert.

**Legende:**



Abbildung 35: Charakteristische Eigenschaften einer modularen, bausteinbasierten Beschreibung von Produktionsabläufen (in Anlehnung an GRUNWALD 2002)

## 5.2.6 Ausprägungen und Strukturierung von Prozessbausteinen

### 5.2.6.1 Übersicht

Auf Basis der im vorherigen Abschnitt präsentierten Überlegungen sollen im Folgenden die möglichen Ausprägungen der Prozessbausteine, die zugehörige Struktur sowie die entsprechenden Inhalte detailliert werden. Wie in Abschnitt 5.2.2 dargelegt, sind für die Durchführung eines Arbeitsvorganges die im Ar-

beitsplan hinterlegten verfahrens- und ablaufspezifischen Daten notwendig. Als organisatorisches Hilfsmittel für die Steuerung von Produktionsabläufen werden diese durch auftragsspezifische Daten ergänzt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde zudem die Anforderung definiert, dass das individuelle Produkt als ein zusätzliches Element zur Steuerung der Produktion genutzt werden soll (vgl. Kapitel 3). Dem aktuellen Wissen über den Zustand eines Produktes kommt daher eine essentielle Bedeutung zu, um mögliche Anpassungen oder Optimierungen im Produktionsablauf vornehmen zu können.

Aufgrund der unterschiedlichen Aufgaben im Rahmen der Auftragsdurchführung können die folgenden Ausprägungen von Prozessbausteinen abgeleitet werden:

- *Organisationsbezogener Baustein*: Hinterlegung von auftragsspezifischen Informationen für die Steuerung von Produktionsabläufen;
- *Verfahrens- und ablaufspezifischer Baustein*: Beschreibung von Arbeitsvorgängen mit der zugehörigen Spezifizierung der Verfahrensart und der Bearbeitungsdaten sowie mit betriebsmittelorientierten und technischen Informationen;
- *Dokumentationsbezogener Baustein*: Abbildung von sämtlichen Informationen, die das Werkstück in seiner aktuellen geometrischen Form und Dimensionierung, den zugehörigen technologiebezogenen Eigenschaften sowie der Erzeugnisstruktur beschreiben;

Die in den Abschnitten 5.2.3 und 5.2.4 vorgestellten Referenzinformationsstrukturen des Produkt- und Prozessmoduls dienen als Ausgangspunkt für die Modellierung dieser Prozessbausteine.

### **5.2.6.2 Organisationsbezogener Baustein**

Die für die Auftragsdurchführung und Terminplanung notwendigen Informationen werden im organisationsbezogenen Baustein hinterlegt. Die benötigten Elemente lassen sich aus den organisationsbezogenen Informationen im Produktmodul (vgl. Abschnitt 5.2.3) ableiten. In diesem Zusammenhang wird zwischen auftragsbezogenen Informationen (z. B. Produkt-Nr., Auftrags-Nr.) und ablaufbezogenen Informationen (z. B. Liefertermin) unterschieden (Abbildung 36). Der organisationsbezogene Baustein wird nur einmal in jeder produktindividuellen Prozesskette benötigt.

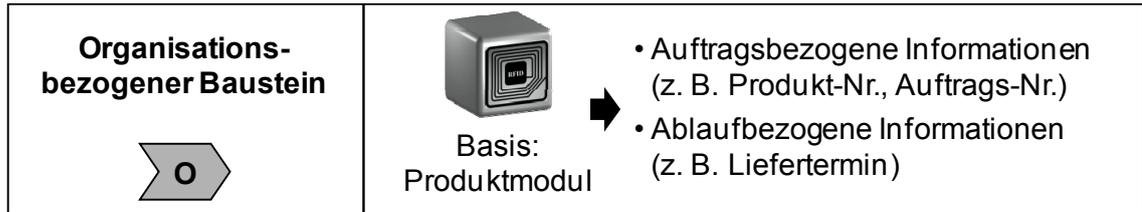


Abbildung 36: Zusammensetzung des organisationsbezogenen Bausteins

### 5.2.6.3 Verfahrens- und ablaufspezifischer Baustein

Die einzelnen Arbeitsvorgänge für die Herstellung eines Werkstückes werden mit einem zugehörigen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteinen beschrieben. Die Darstellung erfolgt auf Basis der im Prozessmodul (vgl. Abschnitt 5.2.4) hinterlegten Spezifikationen zur Verfahrensart, der zugehörigen Bearbeitungsdaten sowie der betriebsmittelorientierten Informationen. Diese Angaben werden durch arbeitsvorgangsbezogene Plandaten (z. B. Durchführungszeiten), durch technologie- und geometriebezogene Informationen sowie durch den Bearbeitungsstatus des Prozessbausteins komplettiert (vgl. Abbildung 37).

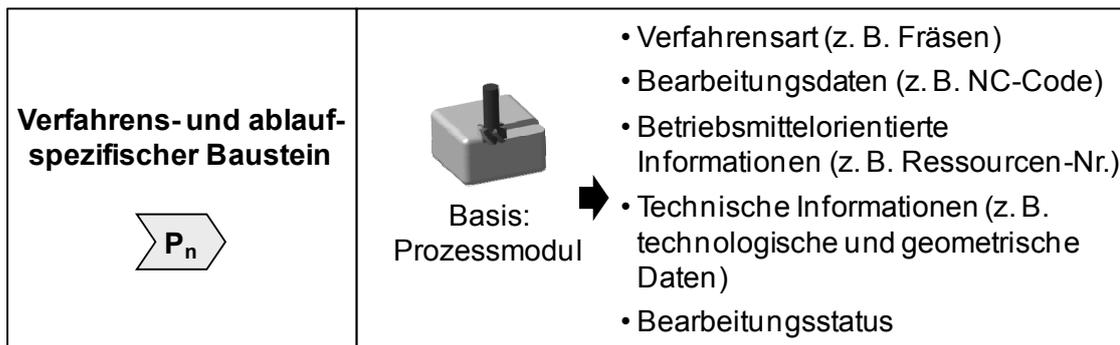


Abbildung 37: Zusammensetzung des verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteins

Mit den technologie- und geometriebezogenen Informationen wird der Plan-Zustand eines Werkstückes nach dem erfolgreichen Abschluss eines Arbeitsvorganges repräsentiert (z. B. Dimensionierung, Formelemente). Die entsprechenden Informationen werden sowohl für die Auswahl von geeigneten Fertigungsressourcen (z. B. ausreichende Arbeitsgenauigkeit) als auch für die Beschreibung des aktuellen Produktzustandes benötigt. Nach dem erfolgreichen Abschluss eines Arbeitsvorganges ergänzen bzw. ersetzen die vorhandenen Plan-Informationen im Prozessbaustein die entsprechenden Daten im dokumentationsbezogenen Baustein (vgl. Abschnitt 5.2.6.4).

Für die Interpretation der produktindividuellen Prozesskette und für die prozesssichere Identifizierung der freigeschalteten Prozessbausteine werden die zuvor

genannten Informationen durch den Bearbeitungsstatus vervollständigt. Der Bearbeitungsstatus eines verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteins kann die Werte *aktiv* (bereit für die Bearbeitung), *naktiv* (nicht bereit für die Bearbeitung), *ok* (Arbeitsvorgang erfolgreich beendet) und *nok* (Arbeitsvorgang nicht erfolgreich beendet) annehmen. Durch eine gezielte Abfrage dieses Elementes können Rückschlüsse über erfolgreich abgeschlossene Arbeitsvorgänge und mögliche nachfolgende Bearbeitungsschritte gezogen werden. Die bausteinbasierte Beschreibung ermöglicht so die Erstellung eines dynamischen Protokolls des Fertigungsablaufes. Bis auf den ersten Prozessbaustein sind zu Beginn der Auftragsdurchführung alle nachfolgenden verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine auf *naktiv* gesetzt. Nach dem erfolgreichen Abschluss eines Arbeitsvorganges wird der Status des entsprechenden Prozessbausteins auf *ok* geändert und die nächstmöglichen Arbeitsvorgänge auf *aktiv* gesetzt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden für die Auftragssteuerung insbesondere Prozessbausteine für die Durchführung von Fertigungs- und Montagevorgängen sowie die Qualitätsprüfung betrachtet und angewendet.

### 5.2.6.4 Dokumentationsbezogener Baustein

Der aktuelle Zustand und die Eigenschaften eines Werkstückes werden im dokumentationsbezogenen Baustein hinterlegt. Die zugehörigen Daten werden aus dem Produktmodul abgeleitet und umfassen eine Beschreibung der geometrischen Form und Dimensionierung des gesamten Werkstückes sowie möglicher Formelemente. Die produktbeschreibenden Informationen werden durch zusätzliche Angaben zum Werkstückmaterial und zur Oberflächenqualität ergänzt. Im Fall von durchgeführten Montageprozessen wird der Baustein durch die Erzeugnisstruktur mit den zugehörigen Einzelteilen vervollständigt (vgl. Abbildung 38).

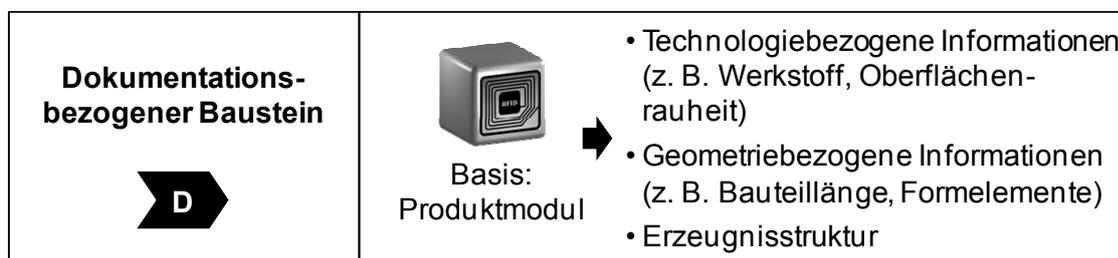


Abbildung 38: Zusammensetzung des dokumentationsbezogenen Bausteins

Der dokumentationsbezogene Baustein wird jeweils nach dem erfolgreichen Abschluss eines Arbeitsvorganges aktualisiert. Dies kann auf Basis der Planinformationen, die in den jeweiligen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteinen hinterlegt sind, erfolgen. Bei der Durchführung einer Qualitätsprüfung wer-

den die entsprechenden Messergebnisse im dokumentationsbezogenen Baustein hinterlegt (vgl. Kapitel 6). Mit Hilfe dieser Informationen kann einerseits die Durchführbarkeit eines Arbeitsvorganges überprüft werden. Andererseits können die Bearbeitungsdaten eines Fertigungs- oder Montageprozesses auf die aktuellen Zustandsinformationen eines Werkstückes referenziert werden (z. B. die Abmessungen des Bauteils). Der dokumentationsbezogene Baustein bildet somit ein essentielles Element für die zustandsbezogene Steuerung eines Produktes durch den Wertschöpfungsprozess. Der Baustein wird, wie der organisationsbezogene Baustein, nur einmal in jeder produktindividuellen Prozesskette benötigt.

### 5.2.6.5 Darstellung von Prozessbausteinen

Für die Modellierung, die Nutzung und den Austausch von Informationen, die in den Prozessbausteinen hinterlegt sind, gilt es einen formalen Beschreibungsstandard zu definieren, der eine kontext- und anwendungsunabhängige Verwendbarkeit gewährleistet. Die Extensible Markup Language (XML) (erweiterbare Auszeichnungssprache) ist eine Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten in Textform. Das World Wide Web Consortium (W3C), das die XML-Spezifikation herausgegeben hat, definiert XML als eine Klasse von Datenobjekten, die XML-Dokumente genannt werden. In der Fachliteratur wird XML als ein vielversprechender Ansatz für die strukturierte Repräsentation von Daten und deren Austausch gesehen (TEUNIS 2003, RUDOLF 2007, VONHOEGEN 2007, SEBESTYEN 2010).

Der logische Aufbau eines XML-Dokumentes ist durch eine hierarchische Baumstruktur gekennzeichnet, die sich aus einzelnen, sequenziell angeordneten Elementen zusammensetzt. Die unterschiedlichen Elemente bilden somit die grundlegende Informationseinheit in XML und werden jeweils von einem Start-Auszeichner (*<Tag-Name>*) sowie einem End-Auszeichner (*</Tag-Name>*) begrenzt. Die Elemente enthalten in der Regel entweder weitere Elemente (Kind-elemente) oder auf der untersten Ebene Zeichendaten. Zusätzliche Eigenschaften von Elementen können mit Hilfe von Attributen beschrieben werden, die dem einzelnen Element beigefügt werden (VONHOEGEN 2007, SEBESTYEN 2010).

Um XML-Dokumente zu nutzen und anderen Anwendungen bereitstellen zu können, müssen gewisse Regeln eingehalten werden. Es muss beispielsweise sichergestellt werden, dass ein XML-Dokument nur ein Wurzelement enthält. Wenn durch die Überprüfung keine Formfehler festgestellt werden, ist das XML-Dokument wohlgeformt. Bei einem Verstoß gegen die Regel der Wohlgeformtheit wird die weitere Verarbeitung unterbrochen. Insbesondere bei einem Datenaustausch zwischen verschiedenen Anwendungen ist es daher sinnvoll, die for-

male Prüfung durch eine zusätzliche Untersuchung auf Gültigkeit zu ergänzen. In diesem Schritt werden die Organisation, die Struktur und der Inhalt des Dokumentes validiert. Die hierfür notwendigen strukturellen und inhaltlichen Einschränkungen werden durch Schemasprachen, wie die Dokumenttypdefinition (DTD) oder die XML-Schemadefinition (XSD), festgelegt. Diese erlauben eine Spezifikation der möglichen bzw. notwendigen Elemente eines XML-Dokumentes mit den zugehörigen Eigenschaften und der jeweiligen Verwendung (VONHOEGEN 2007, SEBESTYEN 2010).

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die entwickelten Strukturen der unterschiedlichen Bausteinausprägungen in entsprechenden XML-Schemata (XSD) hinterlegt. Die Daten und Parameter der einzelnen Bausteine wurden zur kontext- und anwendungsunabhängigen Verwendbarkeit in einer XML-Struktur abgebildet. Die Daten der einzelnen Prozessbausteine, die für die Steuerung von Produktionsabläufen benötigt werden, können so medienunabhängig über dezentrale (z. B. produktbasiert) oder zentrale (z. B. drahtgebundene Netzwerke) Infrastrukturen übermittelt werden.

### **5.2.7 Vernetzung von Prozessbausteinen**

#### **5.2.7.1 Allgemeines**

In den Abschnitten 5.2.5 und 5.2.6 wurde der Ansatz für eine Modularisierung von Produktionsabläufen mit Hilfe von Prozessbausteinen ausführlich erläutert. Dieser ermöglicht eine ressourcenneutrale Beschreibung von einzelnen Arbeitsvorgängen und erlaubt somit eine aufwandsarme Adaption des Produktionsablaufes bei produkt- oder ressourcenbezogenen Störungen. Im vorliegenden Abschnitt soll die Vernetzung der einzelnen Arbeitsvorgänge bzw. Prozessbausteine mit den zugehörigen organisations- und zustandsbezogenen Informationen zu einer produktindividuellen Prozesskette aufgezeigt werden. In der Regel kann ein Produkt auf mehreren, unterschiedlichen Wegen hergestellt werden. Um bei der Auftragsdurchführung dynamische Engpässe und Störungen ausgleichen zu können, müssen daher, neben einer ressourcenneutralen Beschreibung von Arbeitsvorgängen, planerische Freiheitsgrade im Fertigungsablauf nutzbar gemacht werden. Aus diesem Grund sind bei der Beschreibung der einzelnen Arbeitsvorgänge und ihrer Reihenfolge strukturelle Freiheitsgrade bei der Maschinenbelegung, der Arbeitsvorgangsreihenfolge oder alternativen Arbeitsvorgängen zu berücksichtigen (vgl. Kapitel 3). Hierfür ist eine Zusammenfassung von mehreren alternativen Arbeitsplänen, in denen die einzelnen Arbeitsvorgänge als Sequenz angeordnet sind, zu einem verzweigten Arbeitsplan mit mehreren Alternativen

notwendig. Im Rahmen der Auftragsfreigabe muss aus den zur Verfügung stehenden Prozessalternativen die jeweils günstigste Möglichkeit ausgewählt werden. Gleichzeitig wird beim Eintreten einer Störung – soweit erforderlich – ein schnelles Umplanen auf Basis der zur Verfügung stehenden Freiheitsgrade in der produktindividuellen Prozesskette möglich.

Ein weit verbreiteter Ansatz zur Modellierung von konkurrierenden und zeitlich parallelen Abläufen in der Automatisierungstechnik sind Petri-Netze (ABEL 1990, MEHREZ et al. 1995, FELDMANN 1997, SONNENSCHNEIN 1998, SACKMANN 2003). Im folgenden Abschnitt werden die Grundelemente und der Aufbau von Petri-Netzen beschrieben. Im Anschluss daran werden die möglichen kausalen Zusammenhänge zwischen den Prozessbausteinen definiert (vgl. Abschnitt 5.2.7.3). Darauf aufbauend wird in Abschnitt 5.2.7.4 die Integration der Prozessbausteine in eine *produktindividuelle Prozesskette* präsentiert. Zur Gewährleistung einer kontext- und anwendungsunabhängigen Verwendbarkeit sowie zur Kombination mit den bereits hergeleiteten Prozessbausteinen wird zum Abschluss in Abschnitt 5.2.7.5 eine XML-basierte Beschreibung der entwickelten produktindividuellen Prozessketten vorgestellt.

### 5.2.7.2 Grundlagen von Petri-Netzen

Petri-Netze sind endliche, gerichtete Graphen und wurden 1962 von Carl Adam PETRI (1962) entwickelt. Nach TITTMANN (2003, S. 11) sind Graphen „*mathematische Modelle für netzartige Strukturen*“. Allen Netzen ist die Grundeigenschaft gemeinsam, dass sie mindestens zwei verschiedene Arten von Objekten enthalten. In der Graphentheorie werden diese als Knoten und Kanten bezeichnet. Ein Graph  $G$  besteht somit aus einer nichtleeren Menge von *Knoten*  $V$  und einer Menge von *Kanten*  $E$ . Die Inzidenzabbildung ordnet jedem Element  $e \in E$  genau ein Knotenpaar  $i$  und  $j$  ( $i, j \in V$ ) zu und stellt somit eine Verbindung zwischen zwei Knoten her. In diesem Zusammenhang wird zwischen ungerichteten und gerichteten Graphen unterschieden (Abbildung 39). Bei einem *ungerichteten Graphen*  $G = [V, E]$  ist das dem Element  $e$  zugeordnete Knotenpaar  $i, j$  nicht geordnet und gibt somit keine Reihenfolgebeziehung vor. Um einen *gerichteten Graphen* oder *Digraphen*  $G = (V, E)$  (engl. directed graph) handelt es sich, wenn das einem Element  $e$  zugeordnete Knotenpaar geordnet ist. In diesem Fall werden die Elemente  $e \in E$  als *gerichtete Kanten* oder *Pfeile* bezeichnet und verbinden genau einen Anfangsknoten (Startknoten)  $i$  mit einem Endknoten (Zielknoten)  $j$  (TITTMANN 2003, DOMSCHKE & DREXL 2005).

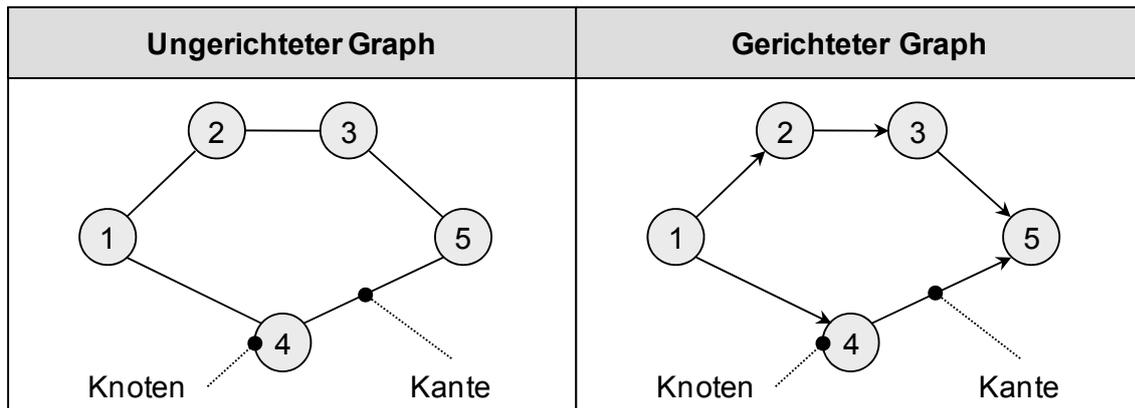


Abbildung 39: Beispiel für einen ungerichteten Graphen (links) und einen gerichteten Graphen (Digraphen) (rechts)

Ein Petri-Netz ist eine spezielle Form eines Graphen, der aus gerichteten Kanten und zwei unterschiedlichen Klassen von Knoten, den Stellen und den Transitionen, besteht (vgl. Abbildung 40). Ein Petri-Netz wird formal als ein Graph  $G = (S, T, F)$  definiert mit (ABEL 1990):

- der nichtleeren, endlichen Menge an Stellen (Zuständen)
 
$$S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\},$$
- der nichtleeren, endlichen Menge an Transitionen des Netzes
 
$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\} \text{ und}$$
- der nichtleeren Menge an Kanten, die Stellen und Transitionen verbinden (Flussrelation)

$$F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S).$$

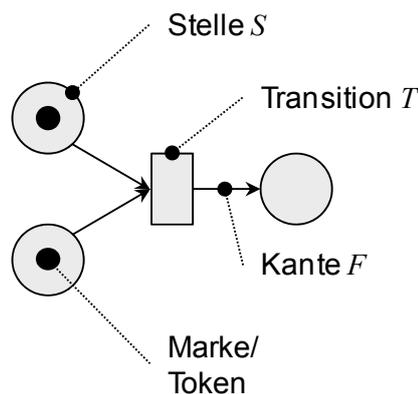


Abbildung 40: Grundelemente eines Petri-Netzes und deren grafische Repräsentation

Die Stellen sind die passiven Elemente eines Petri-Netzes und kennzeichnen zusammen mit den Marken bzw. Token den lokalen Zustand eines Systems. Der

Gesamtzustand eines Systems ergibt sich durch die Menge aller lokalen Zustände. Um Prozess- bzw. Produktionsabläufe beschreiben zu können, müssen die Netzgraphen prozessorientiert interpretiert werden. Dazu können die Stellen im Petri-Netz mit Marken belegt werden. Jede Stelle besitzt eine definierte Kapazität und gibt damit die Anzahl an Marken an, die eine Stelle aufnehmen kann. Eine Stelle kann zu einem bestimmten Zeitpunkt keine, eine oder mehrere Marken enthalten. Durch das Eintreten von definierten lokalen Zuständen können die Voraussetzungen für die Aktivierung von Transitionen geschaffen werden (ABEL 1990, PRIESE & WIMMEL 2008).

Transitionen stehen für Ereignisse bzw. Aktivitäten, die zu einer lokalen Veränderung des Zustandes eines Systems führen. Eine Transition ist aktiviert, wenn durch den Schaltvorgang eine zulässige Folgemarkierung erzeugt werden kann. Dies bedeutet, dass die Markenanzahl auf keiner Stelle negativ werden oder die jeweilige Kapazität überschreiten kann. Im Allgemeinen kann eine Transition somit erst geschaltet werden, wenn die der Transition direkt vorgeschalteten Stellen mit mindestens einer Marke belegt sind. Durch den Schaltvorgang einer Transition wird ein sogenannter Markenfluss verursacht, bei dem die Marken aus dem Vorbereich einer Transition verbraucht und die Marken, die im Nachbereich einer Transition beim Schaltvorgang abgelegt werden, neu erzeugt werden (ABEL 1990, PRIESE & WIMMEL 2008).

Die Verbindungen zwischen Stellen und Transitionen werden als gerichtete Kanten bezeichnet und grafisch als Pfeile in Richtung der Abfolge visualisiert. Die Kanten kennzeichnen somit den Weg, den eine Marke von einer Stelle zu einer Transition oder umgekehrt zurücklegen kann. In grafischer Notation werden Stellen durch Kreise, Transitionen durch Rechtecke und Marken durch Punkte veranschaulicht (vgl. Abbildung 40). Ein Petri-Netz ist ein bipartiter Graph<sup>2</sup>, bei dem nie zwei Stellen oder zwei Transitionen direkt zusammengefügt werden können (ABEL 1990, PRIESE & WIMMEL 2008).

### 5.2.7.3 Definition generischer Prozessstrukturen

Durch die Ausführungen im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass Petri-Netze dazu geeignet sind, Fertigungsfolgen in einer produktindividuellen Prozesskette abzubilden. Als Basiselement für die Darstellung flexibler Produktionsabläufe wird der in Abschnitt 5.2.5 eingeführte Prozessbaustein genommen, da

---

<sup>2</sup> Bei einem bipartiten Graphen lassen sich die Knoten in zwei Mengen einteilen. Alle Kanten verlaufen zwischen zwei Mengen von Knoten und verbinden nie zwei Knoten der gleichen Menge (SEDEWICK 1992).

dieser die kleinste Einheit eines Prozesses mit Steuerungsnotwendigkeit repräsentiert. Zur prozessorientierten Interpretation der Netzgraphen und der Beschreibung des lokalen Zustandes eines Systems besitzt eine Stelle im Petri-Netz, die dem Zustand eines Werkstückes entspricht, per Definition immer die Kapazität eins. Das bedeutet, dass bei einem Schaltvorgang nur eine Marke über eine Kante fließen kann. Vom Grundprinzip entspricht das vorliegende Petri-Netz daher einem Bedingung/Ereignis-Netz (B/E-Netz) (ABEL 1990).

Bei der Modellierung der produktindividuellen Prozessketten ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen Prozessbausteine bzw. Arbeitsvorgänge in der Regel in zeitlichen und kausalen Abhängigkeiten voneinander stehen. Die Koordination der zeitlichen Abhängigkeiten zwischen den jeweiligen Arbeitsvorgängen und den Rahmenbedingungen in der Fertigung werden durch die betrieblichen Planungs- und Informationssysteme übernommen. Im Folgenden werden die möglichen kausalen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Arbeitsvorgängen in einer produktindividuellen Prozesskette aufgezeigt.

In Anlehnung an ALTMANN (1991) und BECKENDORFF (1991) werden drei Ordnungsbeziehungen zwischen einzelnen Arbeitsvorgängen in einer produktindividuellen Prozesskette definiert:

- Sequenziell-Struktur
- Ergänzungs-Struktur
- Alternativ-Struktur

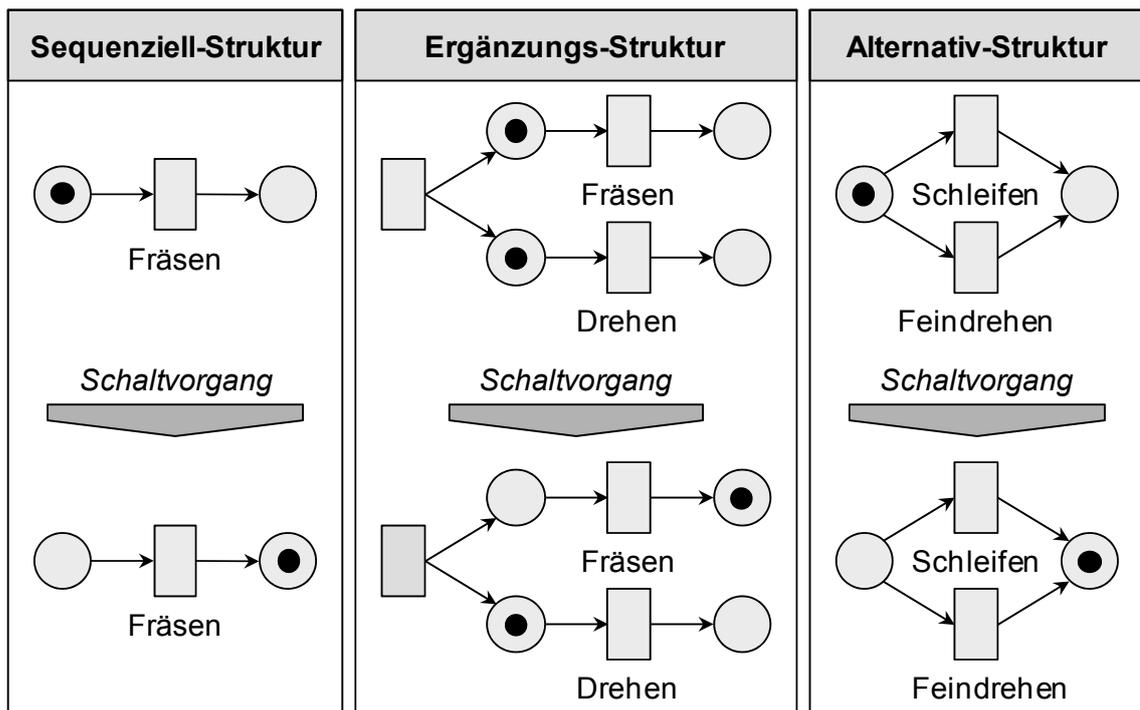
Bei einer *Sequenziell-Struktur* sind die einzelnen Arbeitsvorgänge in einer eindeutigen Reihenfolge zueinander angeordnet und müssen nacheinander durchgeführt werden. Die eindeutigen Vorrangbeziehungen zwischen Bearbeitungsschritten werden durch geometrische oder technologische Rahmenbedingungen erforderlich. Die Arbeitsvorgänge Fräsen, Härten und Schleifen sind ein Beispiel für eine notwendige Bearbeitungsfolge in einer Sequenziell-Struktur.

Im Fall einer kausalen Unabhängigkeit zwischen zwei oder mehreren Arbeitsvorgängen werden diese in einer *Ergänzungs-Struktur* zusammengefasst. Die entsprechenden Bearbeitungsschritte können in einer zeitlich beliebigen Reihenfolge durchgeführt werden. Reihenfolgealternativen sind im Allgemeinen bei technologisch und geometrisch voneinander unabhängigen Arbeitsvorgängen möglich. Da die einzelnen Transitionen den Arbeitsvorgängen entsprechen, kann eine zeitlich parallele Bearbeitung der entsprechenden Elemente nicht stattfinden. Wenn ein Pfad von den betrieblichen Planungs- und Steuerungssystemen gewählt wurde, muss dieser sequenziell abgearbeitet werden. Ein Wechsel zwischen ver-

schiedenen Bearbeitungspfaden ist nur möglich, wenn ein Ergänzungspfad komplett abgearbeitet wurde und eine Synchronisation durch eine gemeinsame Transition stattfinden kann. Bei Verwendung einer Ergänzungs-Struktur in einer produktindividuellen Prozesskette muss jeder Arbeitsvorgang vollständig ausgeführt werden.

Die *Alternativ-Struktur* hingegen bietet die Möglichkeit, mehrere durchführbare Arbeitsvorgänge abzubilden, die zu dem gleichen Fertigungsergebnis führen. Zur Erreichung des Produktionsfortschrittes ist die Auswahl eines geeigneten Pfades ausreichend. Als Beispiel für die Hartfeinbearbeitung kann in diesem Zusammenhang das Feindreihen als Alternative zum Schleifen genannt werden.

Zur Darstellung der zuvor genannten Ordnungsbeziehungen werden die vorgestellten Grundelemente eines Petri-Netzes (Abbildung 40) gemäß den grundlegenden Schaltregeln von Petri-Netzen um UND- bzw. ODER-Verzweigungen erweitert. In Abbildung 41 werden die resultierenden Schaltregeln für die im Rahmen dieser Arbeit genutzten generischen Prozessstrukturen verdeutlicht.



**Legende:**

-  Stelle bzw. Zustand
-  Transition bzw. Arbeitsvorgang
-  Marke
-  Kante

Abbildung 41: Generische Prozessstrukturen für die Modellierung von produktindividuellen Prozessketten mit den zugehörigen Schaltregeln

Bei den Ordnungsbeziehungen *Ergänzungs-Struktur* und *Alternativ-Struktur* tritt der Fall auf, dass mehrere Transitionen gleichzeitig aktiviert sein können. In diesem Fall ist der weitere Fortgang der Zustandsübergänge nicht mehr eindeutig festgelegt. Bei der Alternativ-Struktur wird durch das Schalten einer Transition (z. B. Feindreihen) die Aktivierung einer anderen Transition (z. B. Schleifen) aufgehoben. Ein sogenannter Konflikt kann auftreten, wenn mehrere Transitionen gemeinsame Vor- oder Nachbereiche besitzen. Aufgrund der zeitlichen Abhängigkeit von einzelnen Arbeitsvorgängen liegt ein solcher Konflikt im Rahmen der vorliegenden Arbeit bei einer Ergänzungs-Struktur vor. In diesem Zusammenhang muss die zeitliche Abfolge der betreffenden Arbeitsvorgänge entschieden werden. Um die Konflikte zu lösen, muss von den betrieblichen Planungs- und Steuerungssystemen in beiden Fällen eine zustandsbezogene Entscheidung über alternative Arbeitsvorgänge bzw. die Reihenfolge verschiedener Prozessschritte getroffen werden. Eine solche Entscheidung kann beispielsweise auf Basis der zur Verfügung stehenden Ressourcenauslastungen sowie der entsprechenden Prozess- oder Rüstkosten durchgeführt werden (vgl. Kapitel 7).

Die jeweiligen produktindividuellen Prozessketten lassen sich nun aus den vorgestellten, grundlegenden generischen Prozessstrukturen ableiten. Die für den spezifischen Anwendungsfall möglichen kausalen Zusammenhänge zwischen einzelnen Arbeitsvorgängen sind u. a. von den Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Fertigungstechnologien und den zur Verfügung stehenden Fertigungs- und Montageressourcen abhängig. Die entsprechende Definition erfolgt im Zuge der Arbeitsplanung und ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

### 5.2.7.4 Integration von Prozessbausteinen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Petri-Netz insbesondere für die Steuerung und nicht für die Planung und Simulation von Produktionsabläufen verwendet. Dies bedeutet, dass die in Abschnitt 5.2.6 vorgestellten Ausprägungen von Prozessbausteinen mit den zugehörigen organisations-, prozess- und dokumentationsbezogenen Informationen in die Petri-Netz-basierte Beschreibung integriert werden müssen.

Abbildung 42 zeigt das Petri-Netz eines Produktionsauftrages mit einer zeitlich beliebigen Arbeitsvorgangsreihenfolge (Ergänzungs-Struktur), an dem beispielhaft die während der Auftragsdurchführung erforderlichen Schaltvorgänge veranschaulicht werden können. Die verschiedenen Ausprägungen der Prozessbausteine werden durch (zeitbehaftete) Transitionen dargestellt. Um die produktindividuelle Prozesskette für die Steuerung von Abläufen nutzen zu können, sind die jeweiligen organisations-, prozess- und dokumentationsbezogenen Informationen

den entsprechenden Transitionen zugeordnet. Die Stellen im Prozessnetz repräsentieren mögliche Zwischenzustände eines Auftrages bzw. Produktes im Herstellungsprozess.

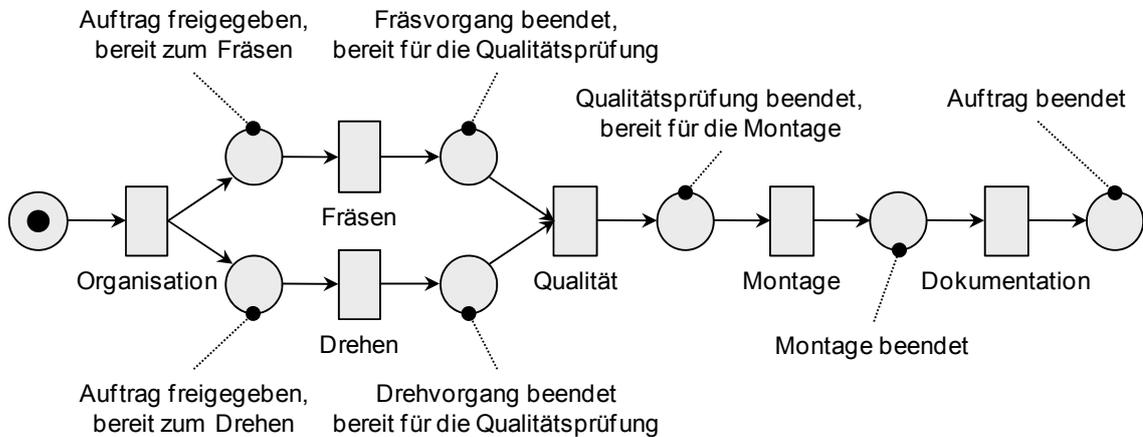
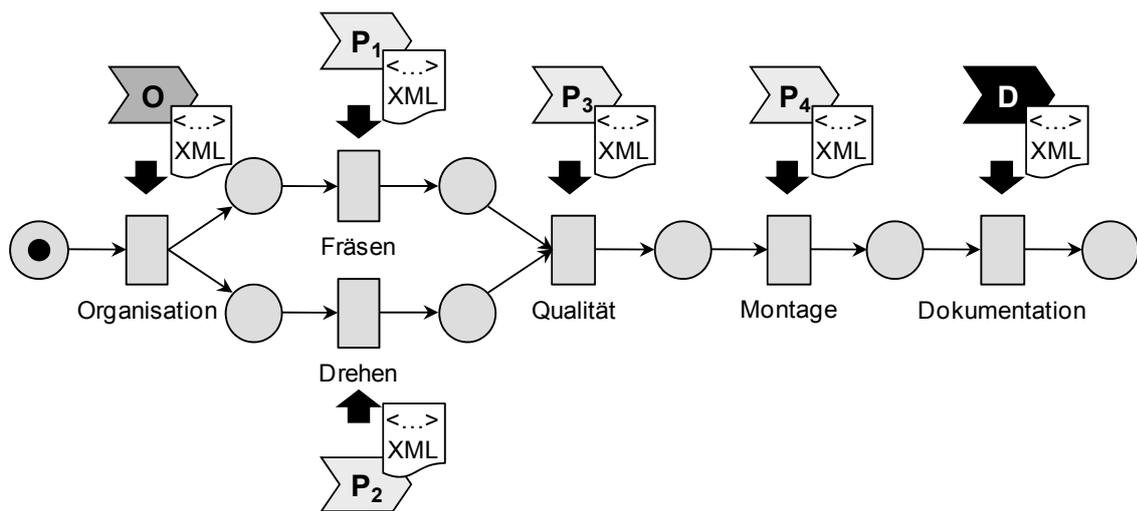


Abbildung 42: Beispielhaftes Petri-Netz eines Produktionsauftrages mit einer Ergänzungs-Struktur

Der organisationsbezogene Baustein enthält die für die Auftragsdurchführung und Terminplanung erforderlichen auftrags- und ablaufbezogenen Informationen. Die Daten in diesem Baustein sind entscheidend für den Zeitpunkt der Freigabe eines Auftrages und für die Steuerung des Auftrages durch die Fertigung. Aus diesem Grund ist der organisationsbezogene Baustein immer der ersten Transition der produktindividuellen Prozesskette zugeordnet. Die nachfolgenden Transitionen des organisationsbezogenen Bausteins müssen in einer Sequenziell-Struktur angeordnet sein. Die Transition des organisationsbezogenen Bausteins wird geschaltet, sobald der Auftrag für die Produktion freigegeben ist. Durch die zulässigen Folgemarkierungen werden die entsprechenden verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine freigeschaltet.

Die einzelnen Arbeitsvorgänge werden mit Hilfe der verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine beschrieben. Die entsprechenden Transitionen sind im Petri-Netz nach dem organisationsbezogenen Baustein eingefügt. Durch die Anordnung der einzelnen Prozessbausteine sollen Funktionen der dynamischen Optimierung (z. B. Alternativprozesse, Reihenfolgealternativen) unterstützt werden. Dies bedeutet, dass die verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine in einer Sequenziell-, Ergänzungs- oder Alternativ-Struktur miteinander verknüpft sein können. Sobald ein Arbeitsvorgang erfolgreich beendet wurde, schaltet die Transition des zugehörigen Prozessbausteins. Die entsprechend zulässigen Nachfolger in der produktindividuellen Prozesskette werden danach aktiviert.

Im dokumentationsbezogenen Baustein werden technologische und geometrische Informationen zum aktuellen Plan- bzw. Ist-Zustand eines Werkstückes hinterlegt (vgl. Abschnitt 5.2.6.4). Der Baustein ist einen Sonderfall in der Petri-Netz-basierten Darstellung der produktindividuellen Prozesskette, da dort weder arbeitsvorgangsbezogene noch auftrags- oder ablaufbezogene Daten hinterlegt werden. Im Rahmen der Durchführung von Arbeitsvorgängen kann auf die produktbeschreibenden Informationen referenziert werden. Der dokumentationsbezogene Baustein wird nur einmal benötigt und an der letzten Stelle einer produktindividuellen Prozesskette eingefügt. Wie der organisationsbezogene Baustein kann der dokumentationsbezogene Baustein nur in einer Sequenziell-Struktur den vorhergehenden verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteinen zugeordnet werden. Formal wird die Transition des dokumentationsbezogenen Bausteins mit dem erfolgreichen Abschluss eines Produktionsauftrages geschaltet. In Abbildung 43 wird die Integration der XML-basierten Prozessbausteine (vgl. Abschnitt 5.2.6.5) in die produktindividuelle Prozesskette veranschaulicht.



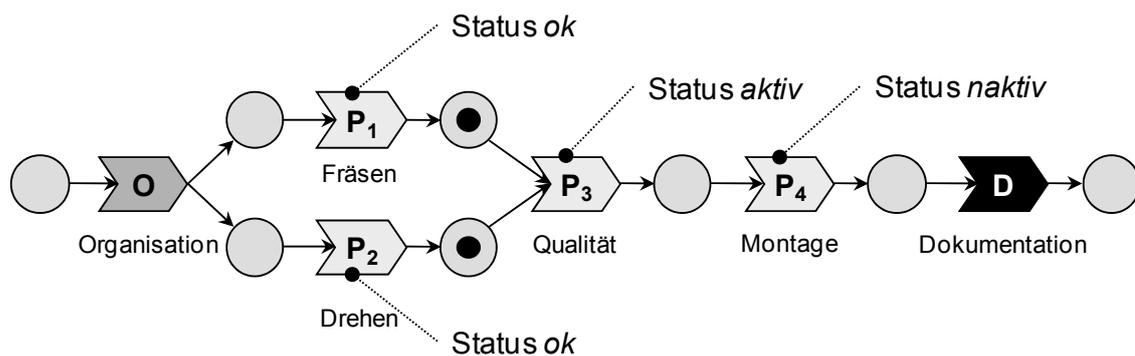
**Legende:**

- |   |                                  |   |   |
|---|----------------------------------|---|---|
|  | Organisationsbezogener Baustein  |  | Verfahrens- und ablaufspezifischer Baustein |
|  | Dokumentationsbezogener Baustein |   |   |

Abbildung 43: Integration der Prozessbausteine in die produktindividuelle Prozesskette

Neben der Abbildung der jeweiligen Prozessbaustein-Ausprägungen und der zugehörigen Fertigungsfolgen werden durch die Petri-Netz-basierte Darstellung auch die Zwischenstände eines Auftrages abgebildet. In diesem Zusammenhang wurde in Abschnitt 5.2.6 der *Bearbeitungsstatus* eingeführt. Sobald ein Prozessbaustein (Transition) in der produktindividuellen Prozesskette aktiviert ist, wird

der Status im entsprechenden Baustein auf *aktiv* gesetzt. Wenn ein Arbeitsvorgang erfolgreich abgeschlossen und die Transition geschaltet wurde, wird der jeweilige Status von *aktiv* auf *ok* gesetzt. In Abhängigkeit der Prozessstruktur werden die möglichen Folgemarkierungen erzeugt, indem die nachfolgenden Prozessbausteine aktiviert werden. In den betroffenen Bausteinen wird der Status von *naktiv* auf *aktiv* gesetzt. Im Fall von mehreren aktivierten Transitionen (Ergänzungs-Struktur, Alternativ-Struktur) wird von den betrieblichen Planungs- und Steuerungssystemen eine Entscheidung über die Reihenfolge der Arbeitsvorgänge bzw. den geeigneten Pfad getroffen und in den Prozessbausteinen hinterlegt. Bei einer nicht erfolgreichen Durchführung eines Arbeitsvorganges wird die entsprechende Transition nicht geschaltet und die nachfolgenden Arbeitsumfänge werden somit nicht freigegeben. Der Status wird von *aktiv* auf *nok* geändert. In Abbildung 44 wird der Zwischenstand eines Produktionsauftrages mit den zugehörigen Zuständen in der produktindividuellen Prozesskette beispielhaft aufgezeigt.



**Legende:**

- |  |   |
|--|---|
|  Organisationsbezogener Baustein  |  Verfahrens- und ablaufspezifischer Baustein |
|  Dokumentationsbezogener Baustein |   |

Abbildung 44: Beispielhafte Darstellung des Zwischenstandes eines Produktionsauftrages

**5.2.7.5 Darstellung der produktindividuellen Prozesskette**

Um die Petri-Netz-basierte Darstellung der produktindividuellen Prozesskette für die Steuerung von Produktionsabläufen nutzen zu können, gilt es einen kontext- und anwendungsunabhängigen Beschreibungsstandard zu definieren. Dieser soll die strukturierte Abbildung von Petri-Netzen ermöglichen und einen standardi-

sierten Austausch zwischen Software-Applikationen ermöglichen. Wie in Abschnitt 5.2.6.5 bereits dargelegt, lassen sich diese Anforderungen im Allgemeinen durch die Auszeichnungssprache XML erfüllen.

Die Petri Net Markup Language (PNML) ist eine XML-basierte Dokumentenbeschreibungssprache für Petri-Netze, die in ISO/IEC 15909-2 (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 2011) definiert wurde. PNML bietet die Flexibilität, alle Typen von Petri-Netzen abbilden zu können und gleichzeitig die Möglichkeit, Erweiterungen für denkbare, neue Petri-Netz-Typen zu integrieren (BILLINGTON et al. 2003). In diesem Zusammenhang wird zwischen netztypunabhängigen (Metamodell) und typspezifischen Informationen unterschieden. Durch das Metamodell werden die Elemente eines Petri-Netzes (Stellen, Transitionen und Kanten), die zugehörigen Label (z. B. Namen von Netzelementen, Markierungen von Stellen) sowie Informationen zur Strukturierung (Seiten- und Modulkonzept) des Netzes dargestellt. Für eine geeignete Repräsentation und das Verständnis eines Petri-Netzes ist die grafische Anordnung und Darstellung der entsprechenden Stellen und Transitionen sowie der Verlauf der zugehörigen Kanten von hoher Bedeutung. Mit Hilfe der Auszeichnungssprache werden daher im Metamodell die einzelnen Elemente eines Petri-Netzes (Stellen und Transitionen), deren Verlauf (Kanten) und die jeweiligen Positionen in einem kartesischen Koordinatensystem  $(x, y)$  beschrieben. Diese Informationen können noch durch zusätzliche, softwarewerkzeugspezifische Informationen ergänzt werden. Diese haben keinen Einfluss auf die Beschreibung und die Struktur des Petri-Netzes und sind daher für andere Werkzeuge nicht relevant (WEBER 2002, BILLINGTON et al. 2003).

Die charakteristischen Merkmale der einzelnen Petri-Netz-Typen mit den zugehörigen strukturellen und inhaltlichen Einschränkungen werden durch die Petri-Netz-Typdefinition (PNTD – Petri Net Type Definition) beschrieben. Diese umfassen beispielsweise die Definition von zulässigen Labeln für einzelne Netzelemente bzw. für das gesamte Petri-Netz. In Abbildung 45 ist beispielhaft die Transition „Fräsen“ aus der PNML-basierten Beschreibung des Produktionsauftrages in Abbildung 42 zu sehen. Für weiterführende Informationen zur Petri Net Markup Language wird auf die Arbeiten von WEBER (2002), BILLINGTON et al. (2003) sowie WEBER & KINDLER (2003) verwiesen.

<pre> 1  &lt;?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?&gt; 2  &lt;pnml&gt; 3    [...] 4    &lt;transition id="t2"&gt; 5      &lt;name&gt; 6        &lt;text&gt;Fraesen&lt;/text&gt; 7        &lt;graphics&gt; 8          &lt;offset x="460" y="170"/&gt; 9        &lt;/graphics&gt; 10     &lt;/name&gt; 11     &lt;graphics&gt; 12       &lt;position x="470" y="130"/&gt; 13       &lt;dimension x="40" y="40"/&gt; 14     &lt;/graphics&gt; 15     &lt;toolspecific tool="WoPeD" version="1.0"&gt; 16       &lt;time&gt;0&lt;/time&gt; 17       &lt;timeUnit&gt;1&lt;/timeUnit&gt; 18       &lt;orientation&gt;1&lt;/orientation&gt; 19     &lt;/toolspecific&gt; 20   &lt;/transition&gt; 21   [...] 22 &lt;/net&gt; 23 &lt;/pnml&gt; </pre>	Transition „Fräsen“
---	---------------------

Abbildung 45: PNML-basierte Beschreibung der Transition „Fräsen“ mit den zugehörigen Elementen

Die bisherigen Ausführungen haben gezeigt, dass die XML-basierte Dokumentenbeschreibungssprache PNML eine vielversprechende Möglichkeit zur kontext- und anwendungsunabhängigen Darstellung von Petri-Netzen bietet. Wie im vorherigen Abschnitt bereits dargelegt, müssen in einem zweiten Schritt der organisationsbezogene Baustein, die verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine sowie der dokumentationsbezogene Baustein in die produktindividuelle Prozesskette integriert werden. Hierfür werden im Rahmen dieser Arbeit die jeweiligen Transitionen in der PNML-basierten Auftragsbeschreibung um das Element *<Baustein>* erweitert. In den nachfolgenden Kindelementen wird der zugehörige Prozessbaustein in der jeweiligen Ausprägung eingefügt (vgl. Abschnitt 5.2.6). Die Integration eines organisationsbezogenen Bausteins in eine produktindividuelle Prozesskette wird beispielhaft in Abbildung 46 veranschaulicht (Zeile 21-31). Im vorliegenden Fall ist der Auftrag noch nicht für die Fertigung freigegeben worden, da der *Bearbeitungsstatus* des organisationsbezogenen Bausteins (Zeile 29) auf *aktiv* gesetzt ist. Das bedeutet, dass die erste Transition in der produktindividuellen Prozesskette (organisationsbezogener Baustein) noch nicht geschaltet wurde. Nach der erfolgreichen Auftragsfreigabe wird der Status des organisationsbezogenen Bausteins auf *ok* gesetzt.

<pre> 1 &lt;?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?&gt; 2 &lt;pnml&gt; 3   [...] 4   &lt;transition id="t1"&gt; 5     &lt;name&gt; 6       &lt;text&gt;Organisation&lt;/text&gt; 7       &lt;graphics&gt; 8         &lt;offset x="230" y="170" /&gt; 9       &lt;/graphics&gt; 10    &lt;/name&gt; 11    &lt;graphics&gt; 12      &lt;position x="250" y="130" /&gt; 13      &lt;dimension x="40" y="40" /&gt; 14    &lt;/graphics&gt; 15    &lt;toolspecific tool="WoPeD" version="1.0"&gt; 16      &lt;time&gt;0&lt;/time&gt; 17      &lt;timeUnit&gt;1&lt;/timeUnit&gt; 18      &lt;orientation&gt;1&lt;/orientation&gt; 19    &lt;/toolspecific&gt; 20    &lt;data&gt; </pre>	<b>Organisationsbezogener Baustein</b>
<pre> 21      &lt;Baustein&gt; 22        &lt;AuftragsbezogeneInformationen&gt; 23          &lt;ProduktID&gt;80500&lt;/ProduktID&gt; 24          &lt;ProduktName&gt;Getriebegehaeuse&lt;/ProduktName&gt; 25          &lt;AuftragsID&gt;400&lt;/AuftragsID&gt; 26        &lt;/AuftragsbezogeneInformationen&gt; 27        &lt;AblaufbezogeneInformationen&gt; 28          &lt;Liefertermin&gt;2011-08-29T16:30:00&lt;/Liefertermin&gt; 29          &lt;Bearbeitungsstatus&gt;aktiv&lt;/Bearbeitungsstatus&gt; 30        &lt;/AblaufbezogeneInformationen&gt; 31      &lt;/Baustein&gt; </pre>	
<pre> 32    &lt;/data&gt; 33  &lt;/transition&gt; 34  [...] 35 &lt;/net&gt; 36 &lt;/pnml&gt; </pre>	

*Abbildung 46: Beispielhafte Integration eines organisationsbezogenen Bausteins in eine produktindividuelle Prozesskette*

Für die Modellierung von Petri-Netzen und die Umwandlung in PNML wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Softwarewerkzeug *WoPeD* (Workflow Petri Net Designer) genutzt. Die einzelnen XML-basierten Prozessbausteine sind nach der Generierung des Petri-Netzes manuell in die produktindividuelle Prozesskette eingefügt worden.

## 5.3 Ressourcenmodul

### 5.3.1 Allgemeines

Eine Grundvoraussetzung für die adaptive Steuerung von Produktionsabläufen und für die geeignete Belegung der zur Verfügung stehenden Ressourcen in der Produktion ist eine detaillierte Klassifizierung und Beschreibung der Fertigungsmaschinen und der Arbeitsplätze. Die entsprechenden statischen und dynamischen Informationen sind im Ressourcenmodul hinterlegt, welches damit ein Kernelement für das System zur produktbasierten Steuerung ist. Der statische Modulbereich beschreibt den Aufbau des zu modellierenden Systems und repräsentiert die Betriebsmittelfähigkeiten. Diese enthalten u. a. die Ressourcenart (z. B. Fertigungsmittel, Prüfmittel), geometrische und technologische Beschreibungen der Maschine sowie Informationen hinsichtlich der Kommunikation (z. B. TCP – Transmission Control Protocol). Die genannten Daten werden für die Beurteilung der Durchführbarkeit eines Fertigungsprozesses an einer Ressource genutzt und sind über einen längeren Zeitraum gültig (vgl. Abschnitt 5.3.2). Als eine weitere Grundlage für die Auswahl und Bewertung von Fertigungsressourcen werden die Daten im dynamischen Modulteil genutzt. Das dynamische Ressourcenwissen ist variabel und wird im Produktionsbetrieb ständig aktualisiert. Der aktuelle Zustand der Ressource (z. B. Verfügbarkeit, Kapazitätsauslastung) und die zugehörigen Abläufe werden in diesem Modulbereich hinterlegt (vgl. Abschnitt 5.3.3).

### 5.3.2 Abbildung von Ressourcenfähigkeiten

Das Ressourcen-Modul verwaltet alle in der Produktion eingesetzten Fertigungs- und Montagemittel mit den zugehörigen Komponenten. Zur Gewährleistung eines ganzheitlichen Ansatzes werden sowohl die direkt (z. B. Werkzeugmaschine, Roboter) als auch die indirekt an der Wertschöpfung beteiligte Systeme (z. B. (Zwischen-)Lager, Informations- und Kommunikationssysteme wie beispielsweise RFID) bei der Modellierung berücksichtigt. Auf Basis dieser Konfiguration können die Ressourcen aufwandsarm in ein Produktionssystem integriert werden. Für die Ausführungsphase werden diese Informationen zum Vergleich der Betriebsmitteleigenschaften mit den produktseitigen Anforderungen des Fertigungs- und des Montageprozesses genutzt.

In Ergänzung zu den direkt oder den indirekt an der Wertschöpfung beteiligten Ressourcen wird als übergeordnete Systemeinheit die Arbeitsstation eingeführt. Darunter wird die Aggregation von mehreren Ressourcen oder Arbeitsplätzen zu

einer lokalen Organisationseinheit verstanden. Neben spezifischen Ressourcen zur Wertschöpfung (z. B. Werkzeugmaschine, Montageroboter) besitzt eine Arbeitsstation immer ein Zwischenlager, das aus mehreren Pufferplätzen für Fertigungsaufträge besteht. Für den Austausch von produktspezifischen Informationen zwischen dem Werkstück und der lokalen Organisationseinheit ist an jeder Station darüber hinaus ein RFID-System vorhanden. Arbeitsstationen sind dadurch gekennzeichnet, dass die zugehörigen Maschinen und Anlagen räumlich zusammenhängen und u. U. einzelne Ressourcen gemeinsam nutzen (z. B. Handhabungsmittel, Zwischenlager). Aufgrund der daraus resultierenden Abhängigkeiten wird die lokale Feinplanung und Optimierung von Arbeitsvorgängen auf Arbeitsstationsebene durchgeführt (vgl. Kapitel 7). Die übergeordneten Informationen zu einer Station umfassen beispielsweise die Stationsart, die Stations-Nr., den Stationsnamen und die Kommunikationsadresse (z. B. IP-Adresse) sowie die Anzahl der verfügbaren Pufferplätze. Die Eigenschaften der zugehörigen Maschinen und Anlagen werden auf der Ressourcenebene detailliert.

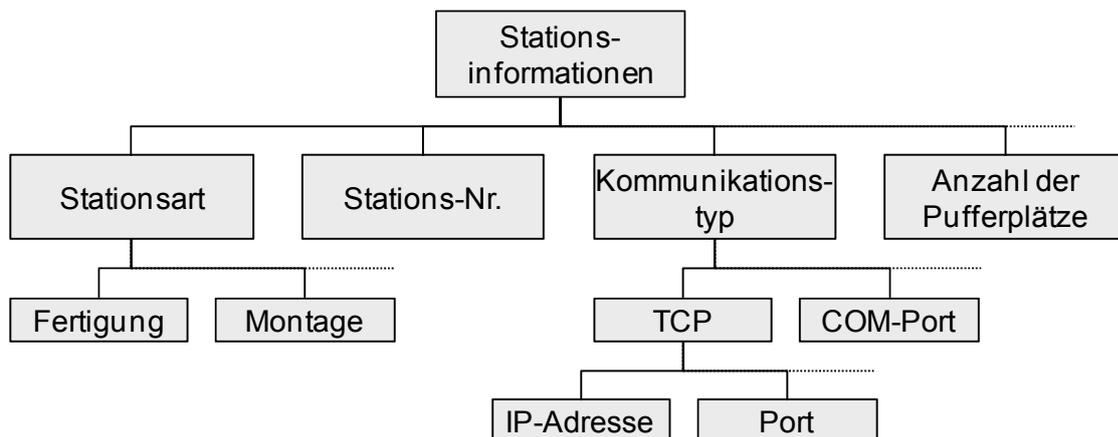


Abbildung 47: Referenzinformationsstruktur für die Beschreibung von Stationen

Die Zuordnung von einzelnen Arbeitsvorgängen zu geeigneten Ressourcen erfolgt im Hinblick auf technische und wirtschaftliche Kriterien. Mit Hilfe des Ressourcenmoduls müssen daher sowohl die technischen Informationen mit einer Beschreibung der durchführbaren Prozesse und möglicher Restriktionen (z. B. Arbeitsgenauigkeit, geometrische Rahmenbedingungen) als auch die wirtschaftlichen Aspekte (z. B. Maschinenstundensätze) berücksichtigt werden. In Anlehnung an die Betriebsmittelbeschreibung von MORYSON (2004) wird auf der obersten Gliederungsebene der Ressource zwischen den folgenden Informationen unterschieden (vgl. Abbildung 48):

- *Organisatorische Informationen*: Grundlegende Angaben zum individuellen Betriebsmittel, wie z. B. Ressourcen-Nummer, Ressourcen-Name, Baujahr, Hersteller und Informationen zur Kommunikation mit der Maschine;
- *Betriebsmittelfähigkeiten*: Beschreibung der Ressourcen mit den zur Verfügung stehenden Funktionalitäten sowie den zugehörigen technologie- und geometriebezogenen Informationen;
- *Wirtschaftlichkeit*: Angaben zu kostenrelevanten Eigenschaften der Ressource wie z. B. Anschaffungskosten, Maschinenstundensatz, Instandhaltungs- und Rüstzeiten;
- *Umgebungseinflüsse*: Darstellung der Rahmenbedingungen für den Einsatz einer Ressource, welche beispielsweise durch Angaben zum Energieverbrauch gekennzeichnet sind;

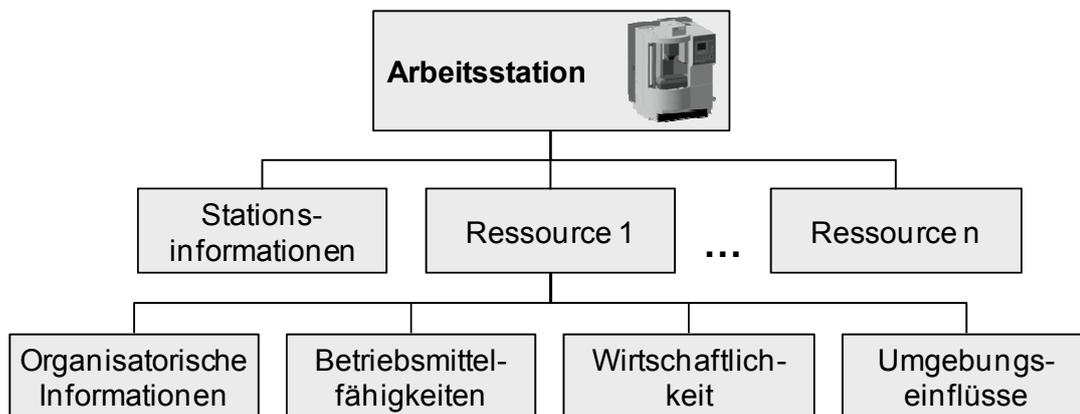


Abbildung 48: Erweitertes Grundobjekt für die Elemente Station und Ressource

Durch die zuvor genannten Informationen lässt sich eine Referenzinformationsstruktur für die Beschreibung von Ressourcen und Arbeitsplätzen in Fertigungs- und Montageumgebungen ableiten. Aufgrund des Umfangs und der hohen Bedeutung des Moduls für das System zur produktbasierten Steuerung wird im Folgenden das Element *Betriebsmittelfähigkeiten* im Detail erläutert. Dieses Element bildet die technische Grundlage für die Auswahl von geeigneten Maschinen und Anlagen zur Zuordnung von Arbeitsvorgängen. Für den Abgleich der auftragsspezifischen Anforderungen mit den ressourcenspezifischen Fähigkeiten ist eine Verknüpfung zwischen dem Prozessmodul und dem Ressourcenmodul notwendig. Die relevanten Merkmale für die Eignungsprüfung, wie beispielsweise die Spezifizierung des Verfahrens oder der Qualitätseigenschaften, müssen daher mit ähnlichen Strukturen und Beschreibungselementen abgebildet werden.

Um die verschiedenen Typen von Ressourcen, die in produzierenden Unternehmen eingesetzt werden, zu repräsentieren, müssen diese hinsichtlich ihrer Funk-

tionalitäten differenziert werden. Zur Gewährleistung einer nachvollziehbaren Strukturierung wird in diesem Zusammenhang auf anerkannte Normen und Richtlinien zurückgegriffen. In dem vorgeschlagenen Datenmodell wird die Ressourcenart daher in Anlehnung an die Gliederung von Betriebsmitteln in der VDI-RICHTLINIE 2815 (1978) beschrieben (vgl. Abbildung 49).

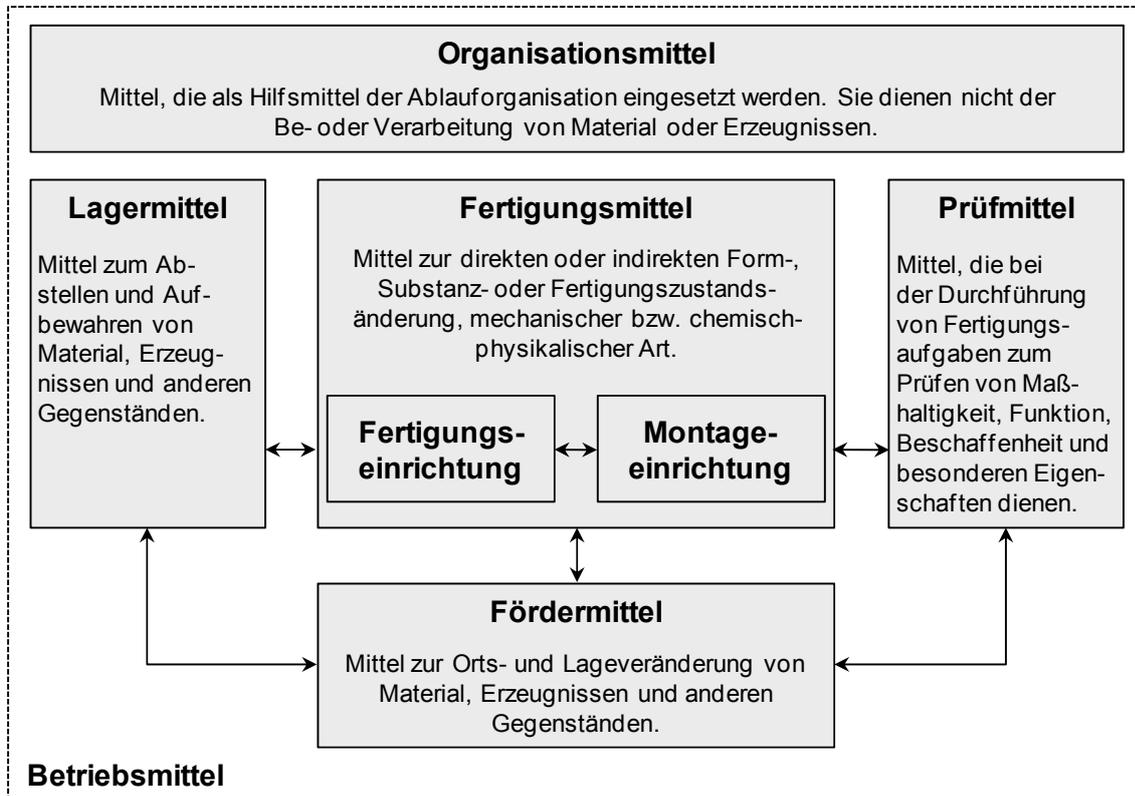


Abbildung 49: Gliederung von Betriebsmitteln mit ihren Abhängigkeiten (in Anlehnung an VDI-RICHTLINIE 2815 1978)

Die VDI-RICHTLINIE 2815 erlaubt eine erste Kategorisierung der zur Verfügung stehenden Maschinen und Anlagen zur Durchführung von Fertigungs-, Montage-, Transport- und Prüfvorgängen. Die Organisationsmittel werden nicht für die Be- oder Verarbeitung von Material eingesetzt, sondern sie dienen auch als Hilfsmittel zur organisatorischen Unterstützung des Wertschöpfungsprozesses. Als Beispiel kann in diesem Zusammenhang der Einsatz von RFID-Systemen genannt werden. Bei den Fertigungsmitteln wird diese Kategorisierung durch eine Spezifizierung der Fertigungsverfahren auf Basis der DIN 8580 sowie der jeweils zugrundeliegenden Normen (z. B. DIN 8589) (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003b, 2003a) ergänzt. Die Nutzung dieser Normen ermöglicht eine Zuordnung von Technologien zu einer Ressource für den Gesamtbereich der Fertigungs- und Montageverfahren. Die formale Beschreibung wird auf der untersten Detaillierungsebene durch die zur Verfügung stehenden Werkzeuge ergänzt (vgl. Abbildung 33 auf Seite 91), da durch diese die Einsetzbarkeit

vieler Maschinen entscheidend bestimmt wird. Durch den hierarchischen Aufbau können die Betriebsmittelfähigkeiten eindeutig spezifiziert werden. Die Zuordnung von mehreren Fertigungsverfahren zu einer Ressource ist von der Hauptgruppe bis zur Untergruppe über alle Ebenen möglich. Als Beispiel sei in diesem Zusammenhang ein Dreh-Fräszentrum genannt.

Neben der grundlegenden Kategorisierung der Betriebsmittel und der durchführbaren Fertigungs- und Montageverfahren ist insbesondere das Leistungsvermögen bzw. die technische Auslegung der Ressource ein wichtiges Entscheidungskriterium für die Zuordnung von Arbeitsvorgängen. In Anlehnung an MORYSON (2004) und KNOCHE (2005) sind in diesem Zusammenhang u. a. technologische und geometrische Angaben zu bearbeitbaren Werkstoffen, Leistungskennwerten und herstellbaren Genauigkeiten bzw. einhaltbaren Toleranzen relevant. Durch die Angabe der Maschinengröße bzw. der zugehörigen Flexibilität werden ungeeignete Ressourcen von der weiteren Planung ausgeschlossen. Die einzelnen Elemente sind in Abbildung 50 verdeutlicht. Es ist zu berücksichtigen, dass die nachfolgenden Detaillierungen insbesondere eine Referenzstruktur für die Beschreibung der ressourcenspezifischen Fähigkeiten aufzeigen sollen. Die hierfür relevanten Angaben sind oft von den eingesetzten Betriebsmitteln abhängig und haben im Rahmen der vorliegenden Arbeit daher einen exemplarischen Charakter (z. B. Leistungskennwerte). Bei der betrieblichen Einführung und Nutzung ist das vorgestellte Ressourcenmodul auf Vollständigkeit zu prüfen und ggf. durch zusätzliche Angaben, die unternehmensspezifisch notwendig sind, zu ergänzen.

Bei der Auswahl von geeigneten Ressourcen ist der zu verarbeitende Werkstoff mit den zugehörigen Eigenschaften von hoher Bedeutung. Im vorliegenden Datenmodell wird dieser Aspekt beispielhaft durch die Angabe der zu verarbeitenden Werkstoffe und der maximalen Werkstoffhärte berücksichtigt. Darüber hinaus stellen die erreichbaren Fertigungsqualitäten ein wichtiges Kriterium zur zielgerichteten und anforderungsgerechten Auswahl von geeigneten Ressourcen dar. In Abhängigkeit der verfügbaren Fertigungsverfahren mit den zugehörigen Werkzeugen sowie den verwendeten Werkstoffen werden die erreichbaren Genauigkeiten und Oberflächenqualitäten (z. B. Oberflächenrauheit) angegeben. Die technologiebezogenen Informationen werden durch Angaben zu den Leistungskennwerten der Ressource ergänzt. Als Beispiel seien in diesem Zusammenhang die maximalen Drehzahlen, die Spindelleistung, die Vorschubleistung oder die Eilgangs- und Bearbeitungsgeschwindigkeiten genannt.

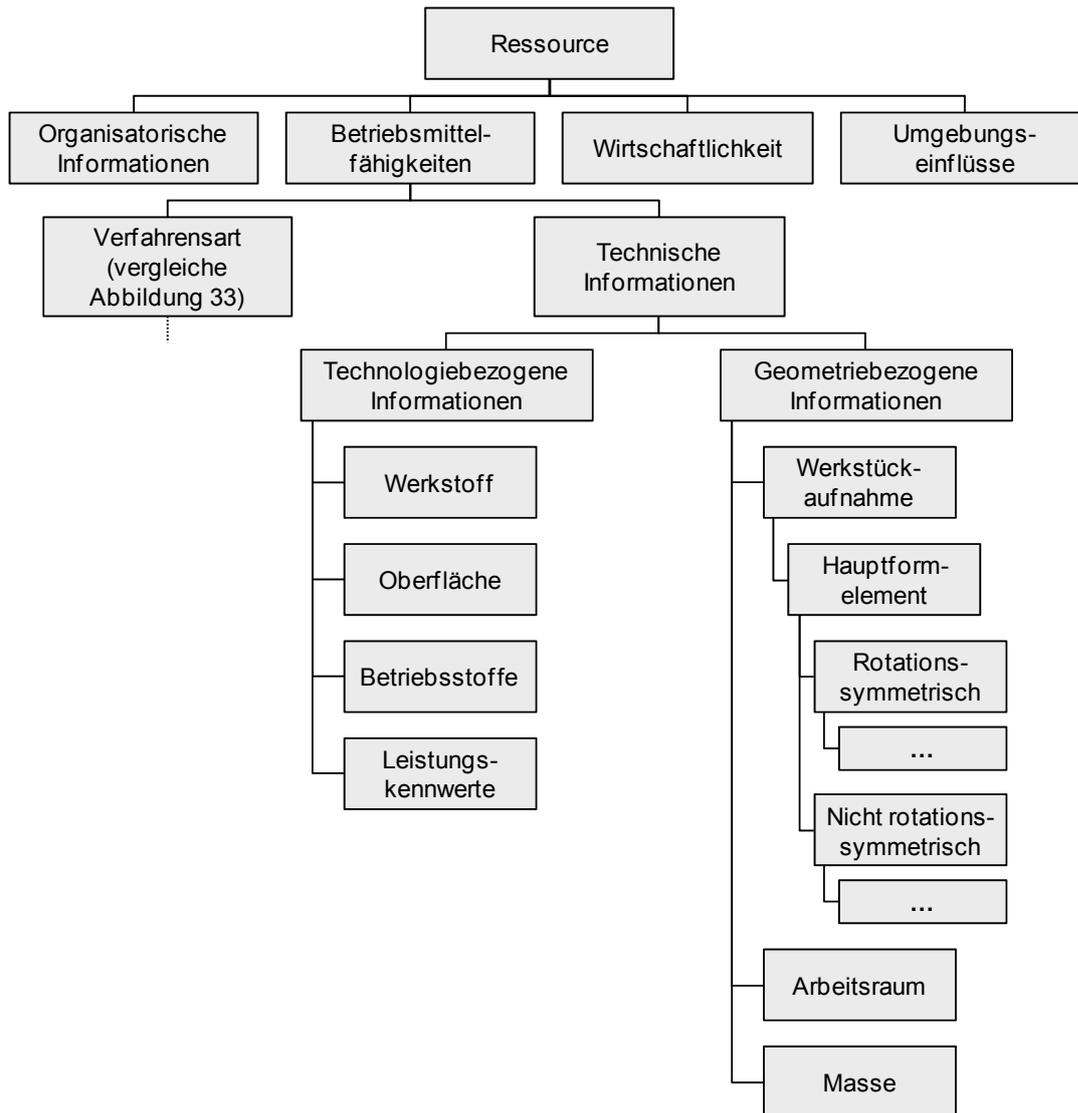


Abbildung 50: Strukturierte Einteilung der technischen Informationen einer Ressource (statischer Modulbereich)

Um sicherzustellen, dass ein bestimmter Arbeitsvorgang an einer Ressource durchgeführt werden kann, müssen die geometrische Form und die Abmessungen des Werkstückes mit den Aufnahmen der Fertigungs- und Montageanlagen sowie den zugehörigen Arbeitsraumgrößen verglichen werden. In Anlehnung an die Beschreibung der geometrischen Form und der Abmessungen des Produktes (vgl. Abschnitt 5.2.3) wird das Spektrum, das von den Ressourcen bearbeitet werden kann, mit Hilfe von standardisierten Geometrieelementen (Hauptformelemente) spezifiziert. Diese Beschreibungssystematik kann sowohl für die Beurteilung der Werkstückaufnahme als auch des notwendigen Arbeitsraumes genutzt werden.

Für eine kontext- und anwendungsunabhängige Verwendbarkeit werden die ressourcenbezogenen Informationen im statischen Modulbereich in einer XML-Struktur zusammengeführt. Die strukturellen und inhaltlichen Einschränkungen

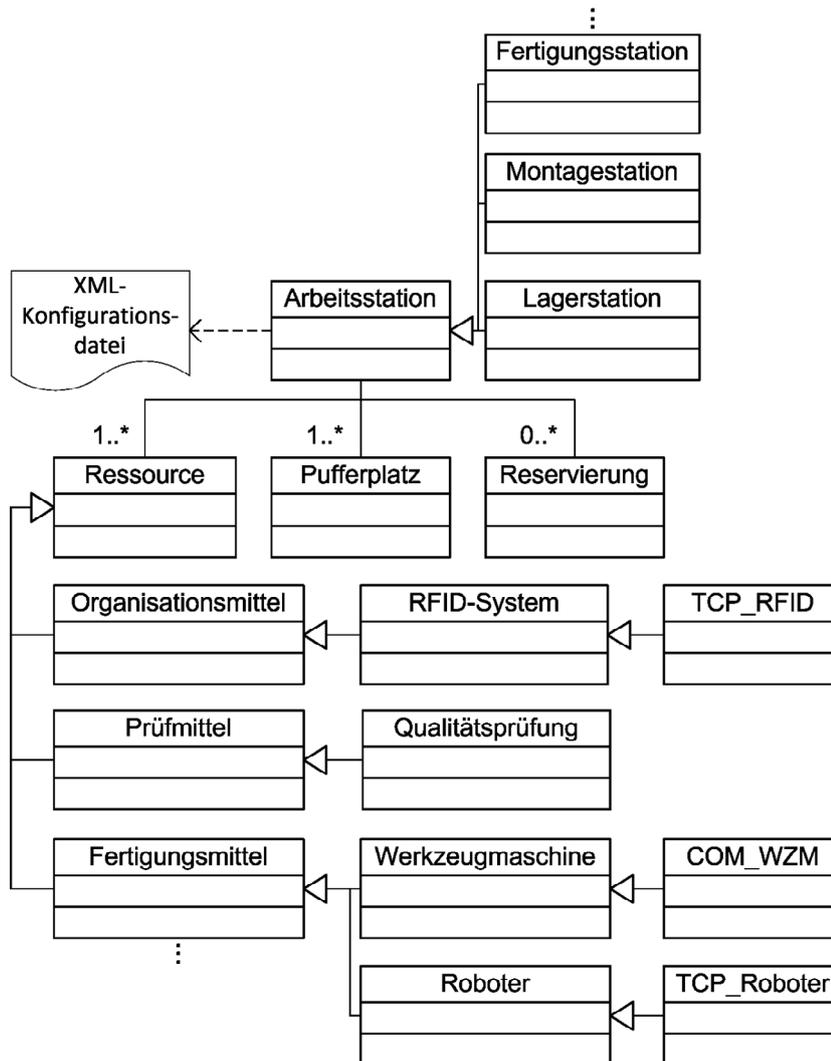
für die prozesssichere Nutzung der Daten werden durch eine XML-Schemadefinition (XSD) festgelegt. In Abbildung 51 ist ein Ausschnitt aus einer beispielhaften XML-basierten Stations- und Ressourcenbeschreibung zu sehen.

1	<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>	
2	<STATION	
3	<Stationsinformationen>	
4	<StationsID>7</StationsID>	Stationsbezogene Informationen
5	<Antennenposition>Puffer</Antennenposition>	
6	<Stationsart>Fertigung</Stationsart>	
7	<AnzahlPufferplätze>4</AnzahlPufferplätze>	
8	<Kommunikationstyp>	
9	<TCP>	
10	<IPAdresse>192.168.10.12</IPAdresse>	
11	<Kommunikationsport>9002</Kommunikationsport>	
12	<Statusport>9003</Statusport>	
13	</TCP>	
14	</Kommunikationstyp>	
15	</Stationsinformationen>	
16	<RESSOURCE>	
17	<OrganisatorischeInformationen>	Ressourcenbezogene Informationen
18	<Maschine>	
19	<RessourcenID>701</RessourcenID>	
20	<RessourcenName>EMCO_ConceptMill_250</RessourcenName>	
21	<Typ>WerkzeugMaschine</Typ>	
22	<Hersteller>EMCO</Hersteller>	
23	<Baujahr>2010</Baujahr>	
24	<Kommunikationstyp>	
25	<COM>COM5</COM>	
26	</Kommunikationstyp>	
27	</Maschine>	
28	</OrganisatorischeInformationen>	
29	<Betriebsmittelfähigkeiten>	
30	<Verfahrensart>	
31	<Fertigung>	
32	<Trennen>	
33	<SpanenMitGeometrischBestimmtenSchneiden>Fräsen</	
34	SpanenMitGeometrischBestimmtenSchneiden>	
35	</Trennen>	
36	</Fertigung>	
37	</Verfahrensart>	
38	[...]	
39	<Betriebsmittelfähigkeiten>	
40	</RESSOURCE>	
41	</STATION>	

Abbildung 51: Ausschnitt aus einer beispielhaften XML-basierten Stations- und Ressourcenbeschreibung

### 5.3.3 Aufbau der Systemarchitektur

Wie im vorherigen Abschnitt aufgezeigt, ist eine Arbeitsstation eine lokale Organisationseinheit, die aus mehreren Ressourcen besteht, welche direkt oder indirekt an der Wertschöpfung beteiligt sind. In Abbildung 52 wird der allgemeine Stations- und Ressourcenaufbau in einem statischen Klassendiagramm in UML-Schreibweise (Unified Modeling Language) veranschaulicht.



**Legende:**



Abbildung 52: Statisches Klassendiagramm des Stations- und Ressourcenaufbaus in UML-Schreibweise

Ein Klassendiagramm beschreibt die Klassen eines Systems und die verschiedenen Arten von statischen Beziehungen zwischen diesen. Durch eine Instanziierung kann aus der Klasse *Arbeitsstation* eine neue, unabhängige und nebenläufig arbeitende Arbeitsstation in ein Produktionssystem integriert werden. Um die interne Struktur der einzelnen Arbeitsstationen zu vereinheitlichen, werden unterschiedliche Stationsarten, wie beispielsweise Fertigungs-, Montage-, Qualitäts- oder Lagerstationen, definiert. Die durchgezogene Linie symbolisiert eine Assoziation und beschreibt eine strukturelle Beziehung zwischen zwei oder mehreren Klassen. Mit Hilfe der Multiplizität wird angegeben, wie viele Instanzen einer spezifischen Klasse (z. B. *Ressource*) mit der Instanz einer anderen Klasse (z. B. *Arbeitsstation*) verknüpft sein können. Für die Multiplizitäten werden jeweils ein unterer und ein oberer Grenzwert definiert. In Bezug auf die vorliegende Arbeit muss eine Arbeitsstation mindestens eine Ressource und einen Pufferplatz enthalten. Aus formaler Sicht können einer Station unbegrenzt (\*) viele Ressourcen und Pufferplätze zugeordnet werden.

Eine Ressource ist einer Arbeitsstation eindeutig zugeordnet und kann über eine Ressourcen-Nr. im Produktionssystem identifiziert werden. Die gemeinsamen Funktionalitäten einer Ressource werden in der übergeordneten Ressourcenklasse beschrieben. Als Beispiel können in diesem Zusammenhang die Ressourcen-Nr. oder eine festgelegte Bestandsgrenze (vgl. Kapitel 7) genannt werden. Um die unterschiedlichen Typen von Ressourcen, die für die Durchführung von Wertschöpfungsprozessen in einem Produktionssystem eingesetzt werden, zu berücksichtigen, werden von der übergeordneten Ressourcenklasse über Generalisierungsbeziehungen Ressourcenarten und -typen abgeleitet. Eine Generalisierung wird in UML mit einer durchgezogenen Linie und einer dreieckförmigen Pfeilspitze symbolisiert, welche von der speziellen Unterklasse auf die allgemeine Oberklasse verweist. Die Ressourcenart lehnt sich an die Gliederung von Betriebsmitteln an, die für die Abbildung der Ressourcenfähigkeiten im vorherigen Abschnitt hergeleitet wurde (vgl. Abbildung 49). Ein Organisations-, Prüf- oder Fertigungsmittel stellt somit eine Unterklasse einer Ressource dar. Von den einzelnen Klassen der Ressourcenart (z. B. Fertigungsmittel) kann wiederum für jeden Ressourcentyp eine weitere Klasse abgeleitet werden. Dies führt dazu, dass spezifische Maschinen und Anlagen (z. B. Werkzeugmaschine, Roboter, RFID-System) im Produktionssystem abgebildet werden können. Um verschiedene Kommunikationswege (z. B. TCP, serielle Schnittstelle), die bei der Ansteuerung einer Ressource genutzt werden können, zu berücksichtigen, wird eine zusätzliche Generalisierungsbeziehung eingeführt. Die Kommunikationsklassen werden von den ressourcentypspezifischen Klassen abgeleitet und enthalten die verbind-

dungsspezifische Umsetzung von Steuerungsbefehlen zu den entsprechenden Maschinen und Anlagen.

Die Grundlage für die Instanziierung der vorgestellten Klassenstruktur stellt eine XML-Konfigurationsdatei dar, in welcher die vorhandenen Ressourcen aufgelistet (z. B. Fräsmaschine, Handhabungsroboter) und spezifiziert (z. B. technische Daten, Kommunikationsadresse) sind (vgl. Abschnitt 5.3.2). Die XML-basierte Beschreibung der stationsspezifischen Konfiguration wird bei der Initialisierung einer Arbeitsstation interpretiert und gibt vor, welche Klassen bei der betrachteten Station zu integrieren sind.

Neben der Integration einer Arbeitsstation in ein Produktionssystem und der entsprechenden Abbildung der zur Verfügung stehenden Betriebsmittelfähigkeiten muss für den Fertigungsbetrieb auch das dynamische, zeitlich veränderliche Ressourcenwissen abgebildet werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden in diesem Zusammenhang insbesondere die allgemeine Verfügbarkeit sowie die Kapazitätsauslastung betrachtet. Um die verschiedenen Methoden der Störungserkennung bei unterschiedlichen Maschinen und Anlagen berücksichtigen zu können, wird die Methode zur Prüfung der Verfügbarkeit in den Kommunikationsklassen der entsprechenden Ressourcen integriert. Dies ermöglicht eine resourcentyp- und verbindungsunabhängige Prüfung der Verfügbarkeit von Maschinen und Anlagen. Beim Vorliegen einer Störung oder einer generellen Nichtverfügbarkeit einer Ressource werden die entsprechenden Zustandsvariablen in der Ressourcenklasse geändert.

Für die Kapazitätsauslastung einer Arbeitsstation und einer Ressource werden sowohl zeit- als auch bestandsbezogene Größen berücksichtigt. Die jeweiligen Kapazitätsgrenzen werden aus zeitlicher und physischer Sicht bei der Konfiguration einer Arbeitsstation im statischen Bereich des Ressourcenmoduls (XML-Konfigurationsdatei) gespeichert. Der aktuelle Bestand und die bereits eingeplanten Aufträge sowie die zeitliche Belastung werden in den Klassen *Pufferplatz* (direkter Bestand) und *Reservierung* (indirekter Bestand) hinterlegt. Als indirekter Bestand werden die Aufträge bezeichnet, die noch an vorgelagerten Fertigungs- und Montageressourcen bearbeitet werden und zu einem späteren Zeitpunkt die betrachtete Arbeitsstation belasten (vgl. Kapitel 7).

### 5.4 Fazit

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels wurde ein Datenmodell für adaptive Produktionssysteme entwickelt, welches auf den anerkannten Grundelementen *Pro-*

*dukt, Ressource* und *Prozess* basiert. Die Abbildung von Produkten und ihrer aktuellen Zustände sowie die Darstellung von Prozessen sind der Ausgangspunkt für die modulare, bausteinbasierte Beschreibung von Produktionsabläufen. Durch die Betrachtung des Grundelementes *Produkt* wird der Zustand des individuellen Werkstückes bei der Verrichtung eines einzelnen Arbeitsvorganges und bei der Durchführung des gesamten Produktionsablaufes berücksichtigt. Im Fall von produkt- oder ressourcenbezogenen Störungen ermöglicht die resultierende produktindividuelle Prozesskette, welche die einzelnen Arbeitsvorgänge und den Produktzustand repräsentiert, eine aufwandsarme Anpassung des Wertschöpfungsprozesses.

Im Ressourcenmodul werden die einzelnen Maschinen und Anlagen eines Produktionssystems abgebildet. Unter Berücksichtigung von Ressourcen, die direkt (z. B. Werkzeugmaschine) oder indirekt (z. B. Kommunikationssysteme, wie beispielsweise RFID) an der Wertschöpfung beteiligt sind, werden statische – über einen längeren Zeitraum gültige (z. B. Betriebsmittelfähigkeiten) – sowie dynamische – zeitlich veränderliche (z. B. Verfügbarkeit) – Informationen im Modul hinterlegt. Das Ressourcenmodul ermöglicht so zum einen eine aufwandsarme Integration einer Arbeitsstation mit den zugehörigen Maschinen und Anlagen in ein Produktionssystem. In Kombination mit dem Produkt- und dem Prozessmodul wird zum anderen das notwendige Wissen abgebildet, welches einen formalen, rechnergestützten Abgleich der auftragsbezogenen Anforderungen mit den ressourcenspezifischen Fähigkeiten ermöglicht.

Die bausteinbasierte Beschreibung von Produktionsabläufen dient im folgenden Kapitel als wichtige Grundlage für das wissensbasierte Störungsmanagement und die daraus resultierende mögliche Adaption von Wertschöpfungsprozessen. In Kapitel 7 wird das Datenmodell für adaptive Produktionssysteme, welches die notwendigen Informationen für die Planung und Steuerung von Produktionsabläufen bereitstellt, für die Entwicklung der Organisationsstruktur genutzt.



## **6 Wissensbasiertes System zum autonomen Störungsmanagement**

### **6.1 Übersicht**

Die im vorhergehenden Kapitel hergeleitete modulare, bausteinbasierte Beschreibung von Produktionsabläufen bildet die Grundlage für die flexible Anpassung von einzelnen Arbeitsvorgängen und die Modifizierung von Produktionsabläufen. Einen vielversprechenden Ansatz für die zugrundeliegende Störungside ntifizierung und -behebung durch eine Adaption von Fertigungs- und Montageabläufen bieten wissensbasierte Systeme (vgl. Abschnitt 4.3 ab Seite 60). In diesem Kapitel wird der Aufbau und die Funktionsweise eines wissensbasierten Systems zum autonomen Störungsmanagement vorgestellt. Eine wesentliche Eigenschaft des Systems ist die Identifizierung von unzulässigen Abweichungen der Ist-Werte eines spezifischen Produktmerkmals (z. B. Oberflächenrauheit, Abmessungen des Bauteils) von den vorgegebenen Soll-Werten. Als Ausgangslage hierfür dienen die im dokumentationsbezogenen Baustein (vgl. Abschnitt 5.2.6.4 ab Seite 98) hinterlegten produktspezifischen Daten (z. B. technologie- und geometriebezogene Informationen). Durch eine Störungsanalyse sollen bei einer unzureichenden Erzeugnisqualität mögliche Handlungsmaßnahmen abgeleitet und der bestehende Produktionsablauf angepasst werden. In diesem Fall werden die identifizierten Nacharbeitsschritte in Form von zusätzlichen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteinen in die bestehende produktindividuelle Prozesskette integriert.

Um die genannten Funktionalitäten zu erreichen, werden in Abschnitt 6.2 die für eine Qualitätsprüfung relevanten Produktmerkmale definiert. Darauf aufbauend erfolgt in Abschnitt 6.3 die Modellierung der Wissensbasis mit dem zugehörigen Störungs- und Maßnahmenwissen. Zum Abschluss des Kapitels wird in Abschnitt 6.4 der Gesamtablauf zum autonomen Störungsmanagement dargestellt.

### **6.2 Definition von Produktqualitätsmerkmalen**

Für die Realisierung eines wissensbasierten Störungsmanagements mit Bezug auf produktbezogene Fehler sind in einem ersten Schritt relevante Produktqualitätsmerkmale zu definieren. Diese sind Voraussetzung für das Erkennen von fehlerhaften Erzeugnisausprägungen. Eigenschaften bzw. Merkmale haben eine Bedeutung (Qualität), wie beispielsweise eine Bauteillänge, und eine Ausprägung

(Quantität) (z. B. 200 mm) (EHRENSPIEL 2009). Nach DIN 2330 können Merkmale eine gegenseitige Abhängigkeit oder Unabhängigkeit aufweisen. Eine Abhängigkeit liegt vor, wenn ein übergeordnetes Merkmal vorhanden sein muss, bevor ein darauf aufbauendes Merkmal hinzukommt (DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1993). In Anlehnung an DYLLA (1991) können Produktqualitätsmerkmale in Beschaffenheits-, Funktions- und Relationsmerkmale unterteilt werden (vgl. Abbildung 53). Mit Hilfe der Beschaffenheitsmerkmale können die Eigenschaften eines Produktes bzw. Werkstückes, wie beispielsweise Abmessungen, Werkstoff und Oberflächenrauheit, spezifiziert werden. Auf Basis der Beschaffenheitsmerkmale (Stellgrößen) ergeben sich die Funktions- und Relationsmerkmale (Folgegrößen). Die geplanten Funktionalitäten eines Produktes werden durch die Funktionsmerkmale beschrieben (z. B. Übertragung eines Drehmoments). Die Eigenschaften eines Erzeugnisses, welche erst in Zusammenhang mit anderen Systemen relevant sind (z. B. Temperaturbeständigkeit, Schwingungen), werden durch die Relationsmerkmale dargestellt (DYLLA 1991, EHRENSPIEL 2009, LINDEMANN 2009).

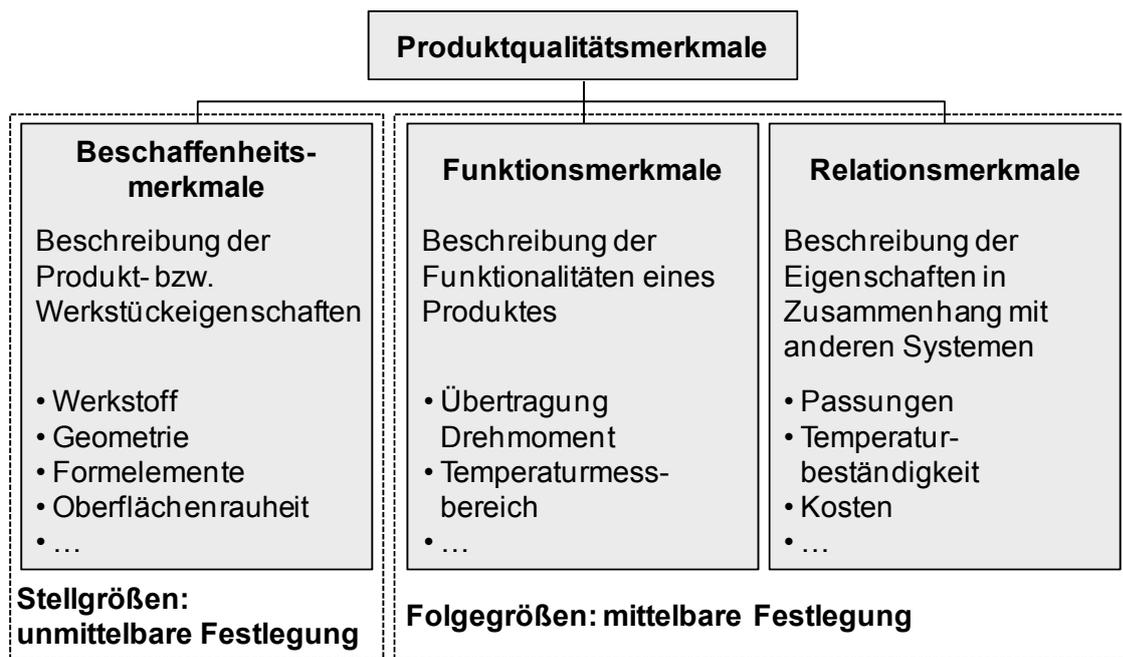


Abbildung 53: Gliederung von Produktqualitätsmerkmalen (in Anlehnung an DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 1993, EHRENSPIEL 2009)

Die Beschaffenheitsmerkmale stellen den Schwerpunkt für die Beschreibung der gesamten Eigenschaften eines Produktes dar. Aus diesem Grund werden die Funktions- und Relationsmerkmale im weiteren Verlauf der Arbeit für das Störungsmanagement nicht weiter betrachtet. Zur Gewährleistung der Kompatibilität mit dem Datenmodell aus Kapitel 5 werden die Beschaffenheitsmerkmale von

Erzeugnissen mit der in Abschnitt 5.2.3 (ab Seite 87) definierten Struktur des Produktmoduls detailliert. Die für das Störungsmanagement relevanten Beschaffenheitsmerkmale werden demnach auf der obersten Detaillierungsebene in technologie- (z. B. Werkstoff, Oberflächenrauheit) und geometriebezogene Informationen (z. B. Abmessungen) sowie die mögliche Erzeugnisstruktur unterteilt.

### **6.3 Modellierung der Wissensbasis**

Der Ausgangspunkt für die Qualitätsprüfung ist die Erfassung von relevanten Merkmalsausprägungen (z. B. geometrie- oder technologiebezogene Informationen) des zu untersuchenden Werkstückes. Die in Abschnitt 6.2 definierten Produktqualitätsmerkmale dienen hierfür als Grundlage. Nach der Aufnahme der Ist- und Soll-Daten erfolgt die wissensbasierte Beurteilung der Erzeugnisqualität und die Ableitung von möglichen Handlungsmaßnahmen. Dieses Vorgehen zur Prüfung und Sicherstellung der Produktqualität kann dem Teilgebiet der technischen Diagnostik zugeordnet werden. Nach PUPPE (1988) eignen sich für den übergeordneten Problemlösungsbereich der Diagnostik insbesondere die regelbasierte und die objektorientierte Wissensrepräsentation (vgl. Abschnitt 4.3.2.3 ab Seite 65). Aufgrund des modularen Aufbaus der Wissensbasis und der guten Verständlichkeit wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine regelbasierte Wissensrepräsentation gewählt. Darüber hinaus liegt das Wissen über die Abweichung des Ist-Wertes eines spezifischen Produktmerkmals vom Soll-Wert bereits in einer Regelform vor, was mit dem folgenden Beispiel gezeigt werden kann:

*Wenn der Durchmesser einer Bohrung außerhalb der Toleranz liegt,  
dann ist die Bohrung fehlerhaft.*

Mit Hilfe der vorliegenden Fakten (Soll- und Ist-Daten) und der angewendeten Regeln können die Entscheidungsvorgänge des regelbasierten Systems detailliert nachvollzogen werden.

Für die Beurteilung der entsprechenden Produktausprägungen und die Generierung von notwendigen Handlungsanweisungen bei Merkmalsabweichungen müssen die zugehörigen Regeln definiert werden. Diese bestehen aus Vorbedingungen (Prämissen) und Aktionen (Konklusionen). Eine Aktion kann wiederum in Form einer Implikation oder einer Handlung dargestellt werden (vgl. Abschnitt 4.3.2.3 ab Seite 65). In Bezug auf die Beurteilung der Produktqualität gibt eine Implikation beispielsweise an, ob eine Abmessung innerhalb einer vorgegebenen Toleranz liegt. Implikationen erlauben somit eine prinzipielle Beurteilung der Produktqualität (Gut- oder Schlechtteil). Im Fall einer unzureichenden Produkt-

qualität werden durch eine Handlung z. B. zusätzlich notwendige Arbeitsvorgänge (Nacharbeit) definiert. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und der Vermeidung von Redundanzen werden die Regeln für das Störungsmanagement in produktunabhängige (allgemeine) Regeln und produktabhängige (produktspezifische) Regeln unterteilt (vgl. Abbildung 54).



**Legende:**

$R_z$  = Gemittelte Rauhtiefe

Abbildung 54: Unterteilung der Wissensbasis in produktunabhängige und produktabhängige Regeln (in Anlehnung an OSTGATHE et al. 2011)

Produktunabhängige Regeln stellen allgemeingültige Regeln dar und weisen immer einen gleichen Bedingungsteil auf. Als Beispiel kann in diesem Zusammenhang die Beurteilung der Oberflächenqualität genannt werden. Wenn die Rauheit eines Bauteils oberhalb des vorgegebenen Grenzwertes liegt, ist die Produktqualität unzureichend. Als produktabhängige Regeln werden die Anweisungen verstanden, die nur für ein spezifisches Erzeugnis zutreffend sind. Zusätzliche Arbeitsvorgänge, die zur Behebung einer unzureichenden Produktqualität notwendig sind, werden mit Hilfe von produktabhängigen Regeln abgeleitet.

Im Rahmen der Qualitätsprüfung werden die entsprechenden Produktausprägungen zunächst mit Hilfe von produktunabhängigen Regeln beurteilt (z. B. Abmessungen, Oberflächenqualität). Zur Beherrschung der Störungskomplexität werden Merkmalsabweichungen anschließend übergeordneten Fehlerdomänen zugeordnet. Diese Fehlerklassifikation (z. B. Maßfehler, Oberflächenfehler, Werkstofffehler) erfolgt in Anlehnung an die in Abschnitt 6.2 definierten Produktquali-

tätsmerkmale und bildet die Grundlage für die Ableitung von erforderlichen Aktionen. Auf Basis der geschlossenen Zustände und der zugehörigen Klassifikationen werden mit Hilfe von produktabhängigen Regeln Handlungsmaßnahmen zur Entstörung abgeleitet. Die Maßnahmen sind einem spezifischen Produkt zugeordnet und bestehen aus einem oder mehreren verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteinen. Um eine eindeutige Abgrenzung gegenüber den regulären verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteinen zu erhalten, werden die Handlungsmaßnahmen im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit sogenannten Nacharbeitsbausteinen dargestellt. Diese Nacharbeitsbausteine enthalten alle notwendigen Informationen zur Durchführung der zusätzlichen Arbeitsvorgänge, wie beispielsweise Bearbeitungsdaten sowie betriebsmittelorientierte und technische Informationen. Aus Gründen der Handhabbarkeit, Erweiterbarkeit und Wartbarkeit werden die Nacharbeitsbausteine den jeweiligen Fehlerdomänen (z. B. Maßfehler, Oberflächenfehler) zugeordnet (vgl. Abbildung 55).

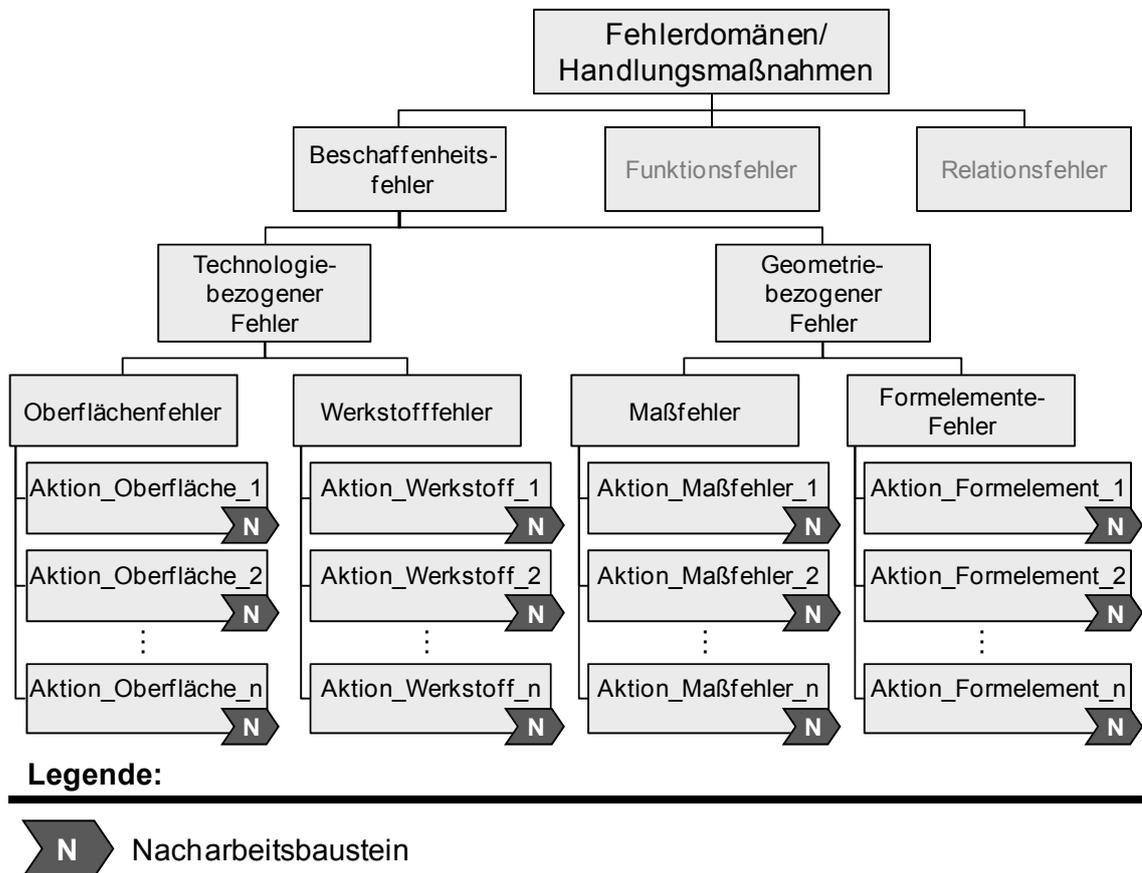


Abbildung 55: Klassifizierung von produktspezifischen Handlungsmaßnahmen

Im Vergleich zu einer einfachen, flachen Struktur der Aktionsdatenbasis kann durch die Klassifizierung zusätzlich eine Minimierung des Rechenaufwandes und eine bessere Übersichtlichkeit der hinterlegten Handlungsmaßnahmen erreicht werden. Nach der Darstellung der Strukturierung und des Aufbaus der Wissens-

repräsentation für das autonome Störungsmanagement wird im folgenden Abschnitt der Ablauf der Qualitätssicherung vorgestellt.

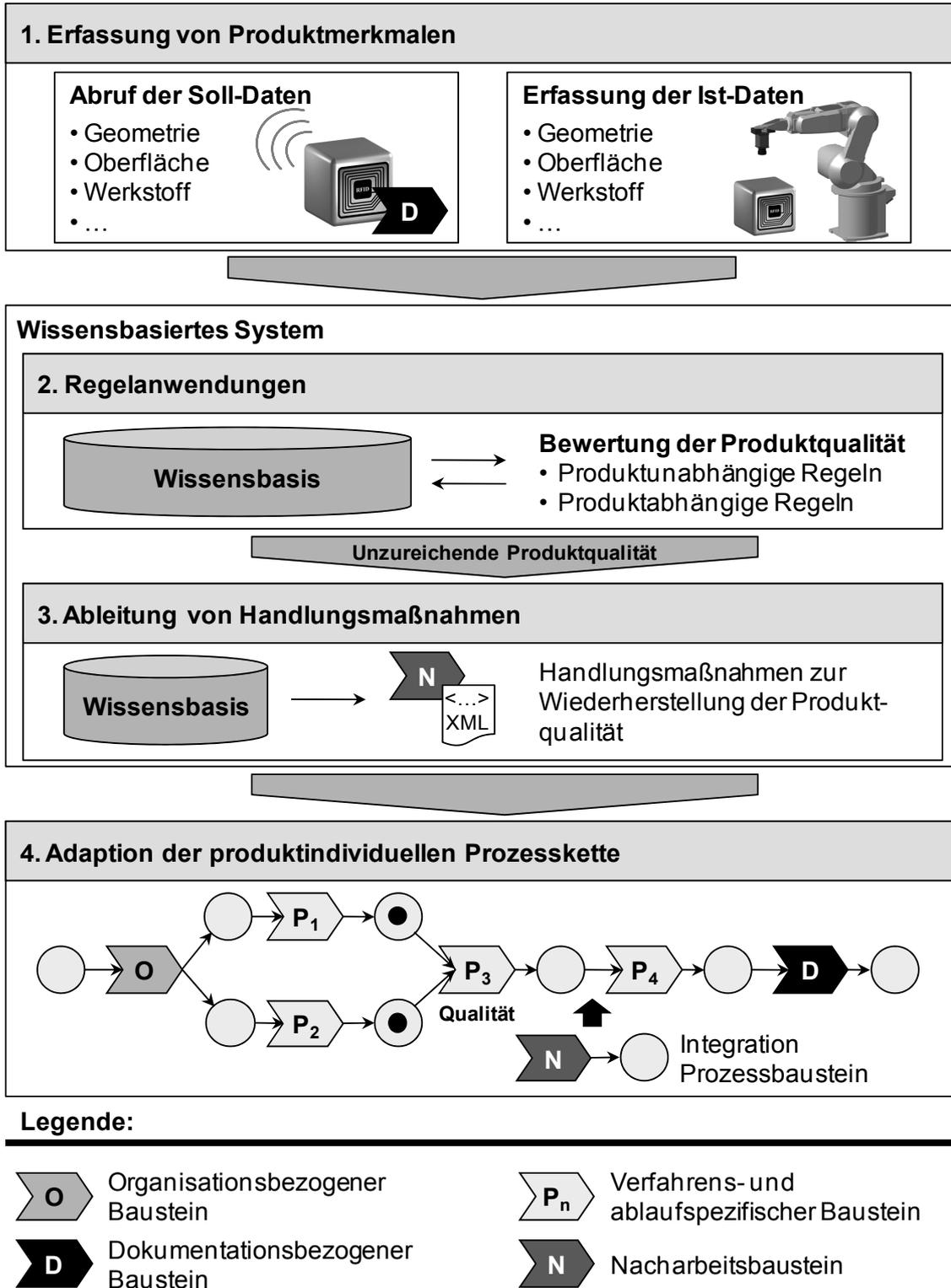
### 6.4 Ablauf des wissensbasierten Störungsmanagements

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Qualitätsprüfung durch einen Qualitätsbaustein in der produktindividuellen Prozesskette initiiert. Dieser Baustein ist in Anlehnung an die verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine (vgl. Abschnitt 5.2.6.3 ab Seite 97) definiert und beinhaltet u. a. den Prüfumfang sowie die zugehörigen Prüfanweisungen. In Anlehnung an die drei Phasen der Fehler- bzw. Störungsbeseitigung in Abschnitt 4.3.1 (ab Seite 60) wird der Ablauf zum wissensbasierten Störungsmanagement in die folgenden vier Schritte eingeteilt (vgl. Abbildung 56):

- Erfassung von Produktmerkmalen
- Regelanwendungen
- Ableitung von Handlungsmaßnahmen
- Adaption der produktindividuellen Prozesskette

Die beiden letztgenannten Schritte werden nur im Fall einer unzureichenden Produktqualität durchgeführt. Beim Vorliegen eines Gutteils endet die Qualitätsprüfung nach dem zweiten Schritt.

Im Zuge der *Erfassung von Produktmerkmalen* werden die im Qualitätsbaustein spezifizierten charakteristischen Eigenschaften (z. B. Abmessungen, Oberflächenrauheit) aufgenommen. Die Aufnahme der Ist-Werte am Bauteil erfolgt entweder manuell durch einen Werker oder mit geeigneten automatisierten Messsystemen (z. B. Laserscanner, CNC-Messmaschine). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird die sensortechnische Realisierung für die Erfassung des Ist-Zustandes nicht betrachtet. In diesem Zusammenhang wird auf anerkannte Forschungsarbeiten verwiesen (z. B. REINHART & TEKOUO 2009). Die Ergebnisse der Ist-Datenaufnahme werden stattdessen durch eine Eingabemaske simuliert. Die entsprechenden Soll-Daten mit den zugehörigen Toleranzen der zu prüfenden Produktmerkmale sind im dokumentationsbezogenen Baustein hinterlegt. Um die wissensbasierte Verarbeitung der definierten Merkmalsausprägungen zu gewährleisten, müssen die Soll- und Ist-Daten anschließend in ein spezifisches Format für die Regelmaschine konvertiert werden (vgl. Abschnitt 8.2 ab Seite 165).



Das Wissen in der generierten Regeldatei wird in der *Regelanwendung* genutzt, um die Erzeugnisqualität zu beurteilen und mögliche Merkmalsabweichungen zu identifizieren. In Abhängigkeit des Anwendungsfalls und der zugrundeliegenden Daten in der Wissensrepräsentation gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Inferenzstrategien (vgl. Abschnitt 4.3.2.4 ab Seite 66). Für den vorliegenden Anwendungsfall der Qualitätssicherung eignet sich insbesondere die Strategie der datengetriebenen Inferenz. Bei der Vorwärtsverkettung werden auf Basis der vorliegenden Fakten (z. B. Ist- und Soll-Daten der Produktmerkmale) anwendbare Regeln gesucht. Durch die Anwendung der produktunabhängigen und produktabhängigen Regeln können vorher noch nicht bekannte Zielzustände abgeleitet werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit kann mit Hilfe der erfassten Produktmerkmale beispielsweise auf eine unzureichende Oberflächenqualität (Implikation) oder auf einen Handlungsbedarf geschlossen werden. Das Ergebnis der Regelanwendung ist eine Übersicht der erkannten Merkmalsabweichungen (z. B. Bauteillänge) und der zugehörigen Fehlerklassifikation (z. B. Maßfehler).

Die *Ableitung von Handlungsmaßnahmen* bilden bei einer unzureichenden Produktqualität den Abschluss der Regelanwendung. Unter Berücksichtigung des Inferenzergebnisses und der zugehörigen Fehlerklassifikation (z. B. Maßfehler) wird die Wissensbasis nach möglichen Handlungsmaßnahmen für das vorliegende Produkt durchsucht. In Abhängigkeit des Ergebnisses der Qualitätsprüfung und der zugrundeliegenden Wissensbasis ergeben sich in diesem Zusammenhang drei Möglichkeiten für mögliche Aktionen (vgl. Abbildung 57).

- Ein oder mehrere Nacharbeitsschritte konnten von der Problemlösungskomponente identifiziert werden. Die zugehörigen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine müssen anschließend in die produktindividuelle Prozesskette integriert werden.
- Durch das wissensbasierte System konnte keine geeignete Handlungsmaßnahme abgeleitet werden. In diesem Fall muss die Wissensbasis durch einen Experten über die Wissensakquisitionskomponente erweitert werden.
- Eine Nacharbeit ist nicht möglich und das untersuchte Erzeugnis stellt einen Ausschuss dar (Handlungsmaßnahme). Das Produkt wird aus dem Produktionsprozess ausgeschleust. Die Auftragssteuerung muss einen neuen Auftrag generieren.

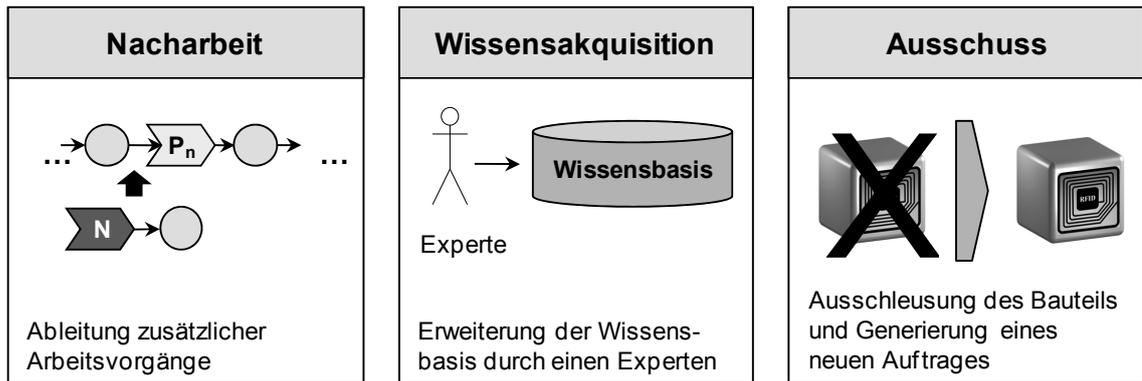


Abbildung 57: Handlungsmaßnahmen bei einer unzureichenden Produktqualität

Nach der erfolgreichen Ableitung von Handlungsmaßnahmen durch das wissensbasierte System müssen die zusätzlichen Arbeitsvorgänge in den Produktionsablauf integriert werden. In diesem Zusammenhang wird eine *Adaption der produktindividuellen Prozesskette* durchgeführt, indem die abgeleiteten verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine in das bestehende Petri-Netz eingefügt werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt die Einbindung der identifizierten Nacharbeitgänge nach dem Qualitätsbaustein. Die verbleibenden Arbeitsvorgänge des ursprünglichen Produktionsablaufes werden nach den zusätzlichen Arbeitsvorgängen in die produktindividuelle Prozesskette integriert. Die ermittelten Ist-Daten der jeweiligen Produktausprägungen werden nach dem Abschluss der Qualitätsprüfung im dokumentationsbezogenen Baustein hinterlegt. Diese Daten können in den nachfolgenden Arbeitsvorgängen als Referenz genommen werden. Nach der Integration der abgeleiteten Handlungsmaßnahmen und der Modifizierung des dokumentationsbezogenen Bausteins sind die Aufgaben des Störungsmanagements abgeschlossen. Das Bauteil wird anschließend für den nachfolgenden Arbeitsvorgang freigegeben.

Im Zusammenhang mit der möglichen Adaption eines Produktionsablaufes durch zusätzliche Arbeitsvorgänge wird eine partielle Neu- bzw. Umplanung von Arbeitsvorgängen, die noch nicht durchgeführt wurden, erforderlich. Dies umfasst zum einen die Einplanung von zusätzlichen Arbeitsvorgängen an den entsprechenden Arbeitsstationen und zum anderen die verzögerte Bearbeitung von Arbeitsvorgängen des ursprünglichen Fertigungsablaufes (z. B. Montage). Die Neu- bzw. Umplanung resultiert sowohl in zusätzlichen Kapazitätsbelastungen durch Nacharbeitsaufwände als auch in Kapazitätsschwankungen durch die zeitliche Verschiebung von Arbeitsvorgängen. Dieser Aspekt wird im nachfolgenden Kapitel im Rahmen der Konzeptionierung der Organisationsstruktur detailliert behandelt.

### 6.5 Fazit

In diesem Kapitel wurde ein wissensbasiertes System für die Beurteilung der Produktqualität entwickelt. Als Grundlage für die Ermittlung von fehlerhaften Erzeugnisausprägungen sind in einem ersten Schritt relevante Produktqualitätsmerkmale definiert worden. In diesem Zusammenhang wurde die Bedeutung der Beschaffenheitsmerkmale eines Werkstückes für das Störungsmanagement aufgezeigt. Im Hinblick auf die grundlegende Fehlerklassifikation sind die Beschaffenheitsmerkmale in Abhängigkeit des in Abschnitt 5.2.3 (ab Seite 87) entwickelten Produktmoduls strukturiert worden.

Auf Basis der definierten Produktqualitätsmerkmale wurde ein regelbasiertes System entwickelt, welches die Identifizierung von werkstückbezogenen Merkmalsabweichungen ermöglicht. Unter Berücksichtigung von produktunabhängigen Regeln erlaubt das System bei einer unzureichenden Erzeugnisqualität eine Fehlerklassifikation (z. B. *Maßfehler*). In diesem Fall können mit Hilfe von produktabhängigen Regeln spezifische Handlungsmaßnahmen (z. B. *Nacharbeit*), die der jeweiligen Fehlerdomäne zugeordnet sind, abgeleitet werden. Die Handlungsmaßnahmen sind als verfahrens- und ablaufspezifische Bausteine, die für die modulare Beschreibung von Produktionsabläufen in Kapitel 5 entwickelt wurden, in der Wissensbasis abgelegt. Aus diesem Grund kann bei Bedarf eine aufwandsarme Adaption der produktindividuellen Prozesskette durchgeführt werden.

Das wissensbasierte Störungsmanagement bildet somit die Grundlage für die produktzustandsbezogene Anpassung von Fertigungs- und Montageabläufen. Die entsprechende Integration des vorgestellten Ansatzes in die Organisationsstrukturen wird im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

## **7 Organisationsstruktur für das System zur produktbasierten Steuerung**

### **7.1 Übersicht**

Die zentrale Zielsetzung der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Systems zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Als Grundlage hierfür wurde zum einen in Kapitel 5 ein ganzheitliches Datenmodell mit einer formalen Beschreibung von Produktionsabläufen und den zur Verfügung stehenden Ressourcen hergeleitet. Zum anderen wurde in Kapitel 6 ein wissensbasiertes System entwickelt, welches den regelbasierten Soll-/Ist-Abgleich von spezifischen Produktmerkmalen und die automatisierte Ableitung von möglichen Handlungsmaßnahmen ermöglicht. Darauf aufbauend wird im Rahmen des vorliegenden Kapitels die Organisationsstruktur des Gesamtsystems definiert.

Im folgenden Abschnitt 7.2 wird zunächst der grundlegende Lösungsansatz detailliert. Aufgrund der zentralen Bedeutung des individuellen Produktes und der zugehörigen Daten für den Fertigungsablauf werden in Abschnitt 7.3 die grundsätzlichen Konzepte zur zentralen und dezentralen Datenhaltung diskutiert. In Abschnitt 7.4 erfolgt die Entwicklung der Organisationsstruktur, welche die Strukturierung und Segmentierung von Entscheidungskomplexen bei der Auftragsdurchführung umfasst. Zudem werden das entwickelte Datenmodell und das wissensbasierte System zum autonomen Störungsmanagement in die Organisationsstruktur integriert. Die Entwicklung von neuartigen Steuerungsprinzipien, beispielsweise zur Auftragsfreigabe oder Reihenfolgebildung, ist nicht Bestandteil dieser Arbeit. Diese Thematik wurde in den vergangenen Jahren in zahlreichen Forschungsarbeiten detailliert behandelt (z. B. LÖDDING 2001, BEGEMANN 2005, BORNHÄUSER 2009). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen vielmehr Bibliotheken mit Planungsfunktionen in die Organisationsstruktur integriert werden. Dadurch wird die Möglichkeit einer anforderungsgerechten Konfiguration des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen geschaffen. Um die entwickelte Architektur mit den einzelnen Bestandteilen validieren zu können, werden zum Abschluss der Arbeit bestehende Steuerungsverfahren beispielhaft in die zugehörigen Planungsbibliotheken der Organisationsstruktur integriert.

### 7.2 Idee und Lösungsansatz

Bei der Entwicklung und Auslegung von Organisations- und Steuerungsstrukturen sind nach FRESE (2005) insbesondere die zwei nachfolgenden Aufgabenbereiche zu betrachten:

- Definition von Entscheidungskompetenzen für die einzelnen Organisationseinheiten
- Festlegung der vertikalen und horizontalen Kommunikationsbeziehungen zur Regelung des Informationsaustausches zwischen den Organisationseinheiten

In diesem Zusammenhang wurde in Abschnitt 4.2 (ab Seite 41) nachgewiesen, dass hybride Organisationsstrukturen die Vorteile einer zentralen Koordination und die Flexibilität von dezentralen Steuerungselementen miteinander verbinden. Um den in Kapitel 3 definierten Anforderungen hinsichtlich der Durchlauf- und der Arbeitsplanflexibilität gerecht zu werden, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit eine hybride Organisationsstruktur mit globalen und lokalen Organisationseinheiten vorgeschlagen. Die globale Organisationseinheit führt die initiale Ressourcenauswahl und -belegung durch, stellt eine gleichmäßige Kapazitätsauslastung der zur Verfügung stehenden Ressourcen sicher und gibt die Aufträge für die Produktion frei. Eine lokale Organisationseinheit entspricht einer Arbeitsstation, die aus mehreren Ressourcen oder Arbeitsplätzen bestehen kann (vgl. Abschnitt 5.3 ab Seite 113). Die Fertigungsaufträge werden nach der Auftragsfreigabe an die jeweiligen Organisationseinheiten in der Werkstattebene übergeben. Diese verfügen über lokales Stations- und Ressourcenwissen und besitzen Freiräume für produktionsnahe Entscheidungen. In diesem Zusammenhang werden den verschiedenen Organisationseinheiten Planungsfunktionen in Bibliotheken bereitgestellt, durch welche die lokale Feinplanung (z. B. Reihenfolgeplanung) autonom durchgeführt werden kann. Die Planungsfunktionen berücksichtigen global festgelegte Zielvorgaben (z. B. Termintreue) und können durch weitere, stationsspezifische Zielgrößen (z. B. Rüstkostenminimierung) ergänzt werden. Mit Hilfe unterschiedlicher Methoden bzw. Verfahren (z. B. Schlupfzeit, Rüstkostenoptimierung, Ablaufoptimierung in der Montage (ZAEH et al. 2010)) wird so eine bedarfsorientierte Optimierung hinsichtlich definierter Zielsetzungen für die einzelnen Organisationseinheiten erreicht. Durch die Verteilung der Entscheidungskompetenzen wird die Steuerung der Zielgrößen der Fertigungssteuerung (vgl. Abschnitt 2.4.2 ab Seite 20) auf globale und lokale Organisationseinheiten aufgegliedert.

Die Verlagerung von Entscheidungsfunktionen in die Werkstattebene resultiert in der Anforderung hinsichtlich einer echtzeitnahen Bereitstellung von aktuellen produkt- und prozessspezifischen Daten für die Feinplanung und die operative Ausführung von Arbeitsvorgängen. Dies gilt insbesondere vor dem Hintergrund, dass der Zustand des Werkstückes sowohl in der Fertigung als auch in der Montage das führende Steuerungskriterium darstellen soll. In Anlehnung an JÜNEMANN & BEYER (1998) wird daher eine starke Kopplung des Informationsflusses an die jeweiligen Werkstücke in der Produktion vorgeschlagen (Abbildung 58). Dadurch soll u. a. die Transparenz im Materialfluss erhöht, eine Synchronisation zwischen Material- und Informationsfluss erreicht und somit die Datenkonsistenz im Produktionsablauf gewährleistet werden.

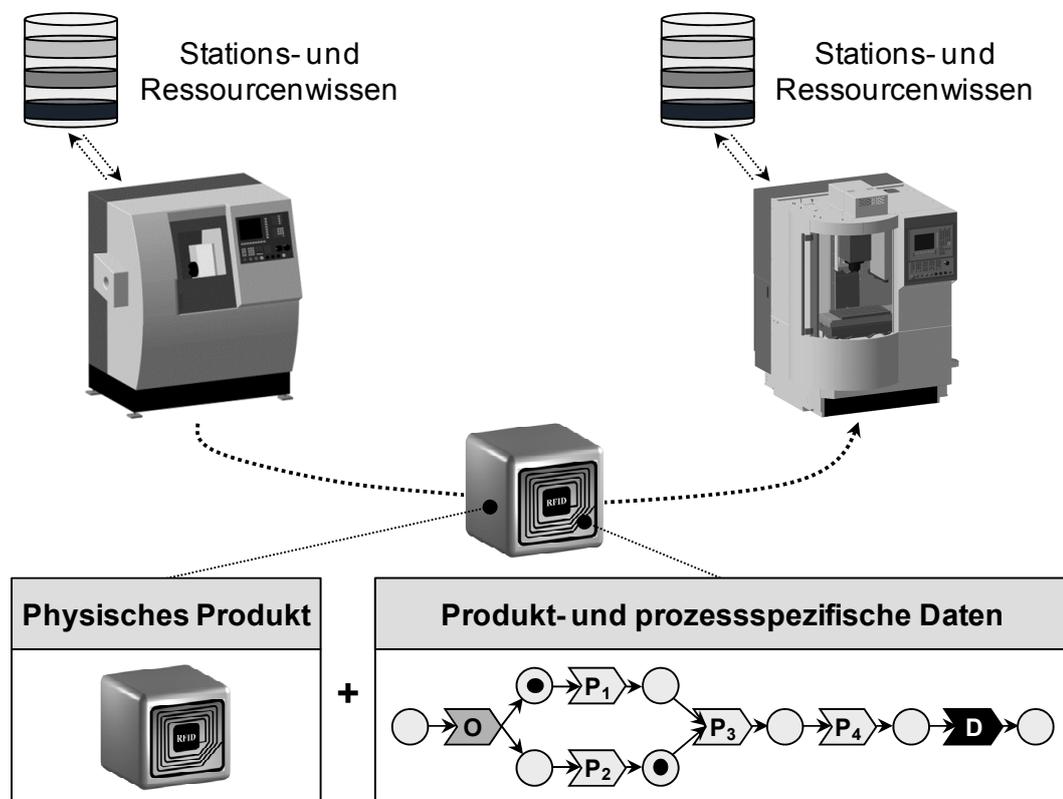


Abbildung 58: Kopplung des Material- und des Informationsflusses mit produkt- und prozessspezifischen Daten

Durch die dezentrale Hinterlegung von ausgewählten produkt- und prozessspezifischen Daten kommt dem individuellen Produkt eine Schlüsselrolle zu. Die Grundlage hierfür bilden die in Abschnitt 5.2.6 (ab Seite 95) hergeleiteten Prozessbausteine und deren Vernetzung zu einer produktindividuellen Prozesskette (vgl. Abschnitt 5.2.7 ab Seite 100). Diese dienen als Basis für die produktzustandsbezogene Ausführung von Fertigungs- und Montageprozessen, d. h. die *produktbasierte Steuerung* (PBS) von Produktionsabläufen. Den einzelnen Organisationseinheiten in der Werkstattebene ist es somit möglich, die Werkstücke

eindeutig zu identifizieren sowie die Feinplanung und Bearbeitung unter Berücksichtigung der aktuellen Produktzustände durchzuführen. Mögliche Verzögerungen oder Störungen im Fertigungsablauf (z. B. Eilaufträge, Nacharbeitsaufwände) können so frühzeitig erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen (z. B. Reihenfolgevertauschung, Adaption des Produktionsablaufes) eingeleitet werden. Als technischer Befähiger für die dezentrale Speicherung von Daten am Produkt wird im Rahmen dieser Arbeit die RFID-Technologie verwendet. Durch die Integration eines RFID-Transponders auf dem bzw. im Werkstück wird ein intelligentes Produkt der Klasse 2 realisiert (vgl. Abschnitt 4.2.3 ab Seite 54).

### 7.3 Datenhaltungsmanagement

Wie im vorhergehenden Abschnitt erläutert, soll im Rahmen der Verlagerung von Entscheidungsfunktionen in die Werkstattebene eine starke Kopplung des Informationsflusses an den Materialfluss erreicht werden. In diesem Zusammenhang werden die produkt- und prozessspezifischen Daten der produktindividuellen Prozesskette (vgl. Abschnitt 5.2.7 ab Seite 100) dezentral am Werkstück hinterlegt. Dieser sogenannte Data-on-Tag-Ansatz steht im Wettbewerb mit der zentralen Bereitstellung von Daten in einem Netzwerk (Data-on-Network) (Abbildung 59).

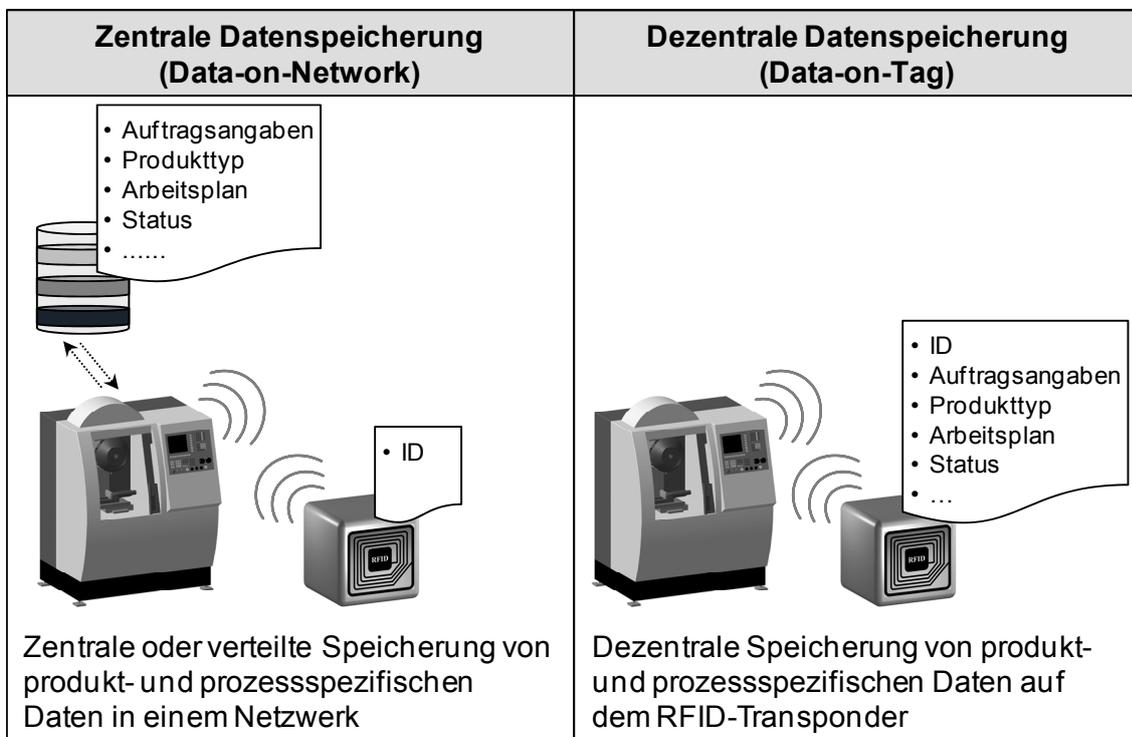


Abbildung 59: Gegenüberstellung der Datenhaltungskonzepte Data-on-Network und Data-on-Tag

Beim *Data-on-Network*-Ansatz sind die Informationen, die einem Produkt zugeordnet sind, zentral oder verteilt in einem Netzwerk gespeichert. In Anlehnung an die Funktionsweise des Barcodes ist auf dem RFID-Transponder eine eindeutige Identifikationsnummer hinterlegt, welche als Referenz für die im Netzwerk gespeicherten Daten dient. Einen weit verbreiteten Ansatz für die eindeutige Kennzeichnung von Objekten stellt der Elektronische Produktcode (EPC) dar, der als einzige Information auf dem Transponder hinterlegt ist. Bei der Erfassung eines RFID-Transponders werden die objektbezogenen Daten aus dem Netzwerk bereitgestellt bzw. die zugehörigen Informationen in der Datenbank aktualisiert. Durch den geringen Speicherbedarf der Identifikationsnummer können beim *Data-on-Network*-Ansatz kostengünstige Transponder mit einer geringen Speicherkapazität verwendet werden. Der Einsatz dieses Datenhaltungskonzeptes ist insbesondere dann sinnvoll, wenn von unterschiedlichen Orten ein gleichzeitiger Zugriff auf die verknüpften Daten gewährleistet werden muss. Die zentrale Speicherung der Daten ermöglicht daher, unabhängig von der physischen Verfügbarkeit eines Objektes, den zeit- und ortsunabhängigen Zugriff auf die Daten (DIEKMANN et al. 2007, WERNER et al. 2007, FINKENZELLER 2008, MELSKI & SCHUMANN 2008).

Die Trennung zwischen einem Bauteil und den zugehörigen Informationen wird beim *Data-on-Tag*-Ansatz aufgehoben. Neben den Identifikationsdaten werden weitere Begleitdaten (z. B. Qualitätsdaten, Arbeitsanweisungen) auf dem RFID-Transponder hinterlegt. Im Gegensatz zur zentralen Datenhaltung (*Data-on-Network*) gibt es zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeit keinen Standard für die dezentrale Speicherung von objektbezogenen Daten auf dem Transponder (PAIS & SYMONDS 2011). Dies liegt u. a. darin begründet, dass dem Ansatz der dezentralen Datenspeicherung in der Literatur bisher nur eine geringe Bedeutung zugekommen ist (DIEKMANN et al. 2007, WERNER et al. 2007). In Tabelle 3 werden die charakteristischen Eigenschaften der zentralen und der dezentralen Datenhaltungskonzepte zusammengefasst.

Neben dem ressourcenbezogenen Wissen, das an den jeweiligen Arbeitsstationen hinterlegt ist, sind für die Durchführung von Arbeitsvorgängen aktuelle produkt- und prozessspezifische Daten notwendig. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist ein gleichzeitiger Zugriff von mehreren Organisationseinheiten auf diese Daten ebenso wie eine echtzeitnahe Abbildung der produkt- und prozessspezifischen Daten in der globalen Organisationseinheit nicht erforderlich. Aus diesem Grund wird die produktindividuelle Prozesskette dezentral am Werkstück hinterlegt. Ergänzend zu den bereits genannten Vorteilen führt die reduzierte Anzahl von Abfragen an zentrale Datenbanksysteme zu einer Entlastung der globalen Organisationseinheit. Durch die Unabhängigkeit von der Netzwerkinfrastruktur steigt

die Robustheit gegenüber unvorhergesehenen Ereignissen. Im Fall einer Störung der globalen Organisationseinheit sind die einzelnen Arbeitsstationen in der Lage, den Umlaufbestand zuverlässig weiter zu bearbeiten. Darüber hinaus können Handhabungs- und Transportprozesse, die nicht global koordiniert werden, mit Hilfe der produkt- und prozessspezifischen Daten autonom durchgeführt werden. Die dezentrale Bereitstellung von Daten am individuellen Produkt kann in diesem Zusammenhang als Befähiger für die Selbststeuerung von Abläufen gesehen werden.

	<b>Data-on-Network</b>	<b>Data-on-Tag</b>
<b>Konzept</b>	Abkopplung von Objekt und Daten	Integration der Daten mit dem Objekt
<b>Voraussetzung für den Datenzugriff</b>	Netzwerk-Infrastruktur	Präsenz des Objektes
<b>Speicherort von Objektdaten</b>	zentral (Datenbanken)	dezentral (Objekt)
<b>Inhalt der Daten auf dem Transponder</b>	Identifikationsnummer (EPC)	Objektbezogene Daten
<b>Art der Daten auf dem Transponder</b>	statisch	dynamisch
<b>Zusatzfunktionen (z. B. sensorische Erweiterung)</b>	in der Regel nicht möglich	möglich
<b>Erforderliche Speicherkapazität auf dem Transponder</b>	gering	hoch
<b>Transponderkosten</b>	gering	hoch
<b>Datensicherheit</b>	Zugriffsmechanismen in Datenbanken	Verschlüsselung bzw. Passwortschutz auf dem Transponder

*Tabelle 3: Charakteristische Eigenschaften zentraler und dezentraler Datenhaltungskonzepte (in Anlehnung an DIEKMANN et al. 2007, MELSKI & SCHUMANN 2008)*

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden intelligente Produkte der zweiten Klasse verwendet. Neben der dezentralen Bereitstellung von Daten sollen bei intelligenten Produkten der dritten und vierten Klasse (vgl. Abschnitt 4.2.3 ab Seite 54) die Daten dezentral verarbeitet und zwischen intelligenten Produkten

kommuniziert werden. Dies bedeutet, dass die Daten in diesen Fällen zwingend dezentral am Objekt gespeichert werden müssen. Der vorgestellte Ansatz bietet in diesem Zusammenhang die Möglichkeit einer aufwandsarmen Umsetzung mit neuartigen intelligenten Produkten, die eine dezentrale Datenhaltung erfordern.

In Bezug auf die Anwendung von dezentralen Datenhaltungskonzepten in der industriellen Praxis können darüber hinaus die folgenden Vorteile genannt werden:

- Systemschnittstellen zwischen unterschiedlichen betrieblichen Planungs- und Informationssystemen können durch eine dezentrale Datenbereitstellung aufwandsarm überbrückt werden.
- Bei echtzeitnahe Entscheidungsbedarf können durch objektbegleitende Datenhaltung, in Abhängigkeit der Netzwerkinfrastruktur, kürzere Antwortzeiten erreicht werden (Melski & Schumann 2008).
- Die dezentrale Bereitstellung von produkt- und prozessspezifischen Daten an den entsprechenden Maschinen und Anlagen bietet insbesondere in kleinen und mittleren Werkstattfertigungen eine Alternative zu kostenintensiven, betrieblichen Planungssystemen, wie beispielsweise MES – Manufacturing Execution Systems.
- Eine Erweiterung durch Sensorelemente ermöglicht die Aufnahme und dezentrale Speicherung von Daten bzw. Messwerten (z. B. Temperatur, mechanische Spannungen) über den Herstellungsprozess oder den Produktlebenszyklus (Reinhart et al. 2010).
- Der unternehmensübergreifende Austausch von produktspezifischen Informationen (z. B. Qualitätsdaten) wird durch bestehende Standards (z. B. EPCIS – Electronic Product Code Information Service) nicht berücksichtigt und kann daher nicht aufwandsarm realisiert werden (REINHART et al. 2011a).

## 7.4 Entwicklung der Organisationsstruktur

### 7.4.1 Allgemeines

Die betrieblichen Planungssysteme (z. B. ERP – Enterprise Resource Planning) bilden die Ausgangsbasis für die Verwaltung und die Bearbeitung von eingehenden Kundenaufträgen. Die auftragsspezifischen Anforderungen werden zuerst an die Arbeitsplanung und anschließend an die Produktionsplanung übergeben. In

Abhängigkeit der Produktkonfiguration werden im Rahmen der Arbeitsplanung die einzelnen Arbeitsvorgänge definiert. Die ressourcenneutrale Beschreibung der verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine (vgl. Abschnitt 5.2 ab Seite 84) umfasst die formale Darstellung der jeweiligen Arbeitsinhalte und der technologischen Anforderungen zu deren Durchführung. Neben der Beschreibung der Arbeitsvorgänge enthalten die Prozessbausteine auch die geplanten Durchführungszeiten, die sich aus den mittleren, prozessbezogenen Bearbeitungszeiten der zur Verfügung stehenden Anlagen errechnen lassen. Unter Berücksichtigung möglicher Freiheitsgrade und Zwangsreihenfolgen bei der Auftragsbearbeitung werden die verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine anschließend zu einer Prozesskette zusammengesetzt. Die Petri-Netz-basierte Beschreibung des Auftragsdurchlaufes wird abschließend durch die Integration eines organisations- und dokumentationsbezogenen Bausteins ergänzt. Die resultierende produktindividuelle Prozesskette mit den einzelnen Arbeitsvorgängen und dem zugehörigen Liefertermin dient der Produktionsplanung als Eingangsgröße für die Erstellung des Auftragsprogramms mit einer initialen Reihenfolge. Eine endgültige Zuweisung der einzelnen Arbeitsvorgänge zu spezifischen Maschinen in der Werkstattebene wird durch die Produktionsplanung nicht durchgeführt. Die resultierende Auftragsliste und die zugehörigen produktindividuellen Prozessketten (Arbeitspläne) werden anschließend an die globale Organisationseinheit übergeben. Die einzelnen Aufgaben der Produktionsplanung, die u. a. die Produktionsbedarfsplanung und die Fremdbezugsplanung umfassen (vgl. Abschnitt 2.4.3 ab Seite 25), werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter betrachtet.

Die Kommunikationsbeziehungen im System zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen sind in Abbildung 60 dargestellt. Die Auftragsreihenfolge wird von der Produktionsplanung vorgegeben und bildet die Grundlage für die Zuweisung der einzelnen Arbeitsvorgänge (verfahrens- und ablaufspezifische Bausteine) zu spezifischen Ressourcen in der Werkstattebene. Bei vorhandenen Freiheitsgraden im Produktionsablauf (Ergänzungs- bzw. Alternativ-Struktur, vgl. Abschnitt 5.2 ab Seite 84) wird eine initiale Auswahl der Reihenfolge bzw. der Arbeitsvorgangsalternative durch die globale Organisationseinheit durchgeführt. Die Referenzierung startet durch einen formalen Abgleich der produkt- und der prozessspezifischen Anforderungen mit den ressourcenspezifischen Fähigkeiten. Die globale Organisationseinheit reserviert die entsprechenden Kapazitäten der ausgewählten Ressourcen. Durch die Zuordnung der einzelnen Arbeitsvorgänge zu Maschinen und Anlagen in der Werkstattebene werden die Werte der entsprechenden Elemente in den zugehörigen Prozessbausteinen der produktindividuellen Prozesskette spezifiziert. Im Rahmen der anschließenden Auftragsfreigabe werden diese Informationen auf dem intelligenten Produkt hinterlegt.

Gleichzeitig wird ein Auftrag von der globalen Organisationseinheit an die lokalen Organisationseinheiten in der Werkstattebene übergeben.

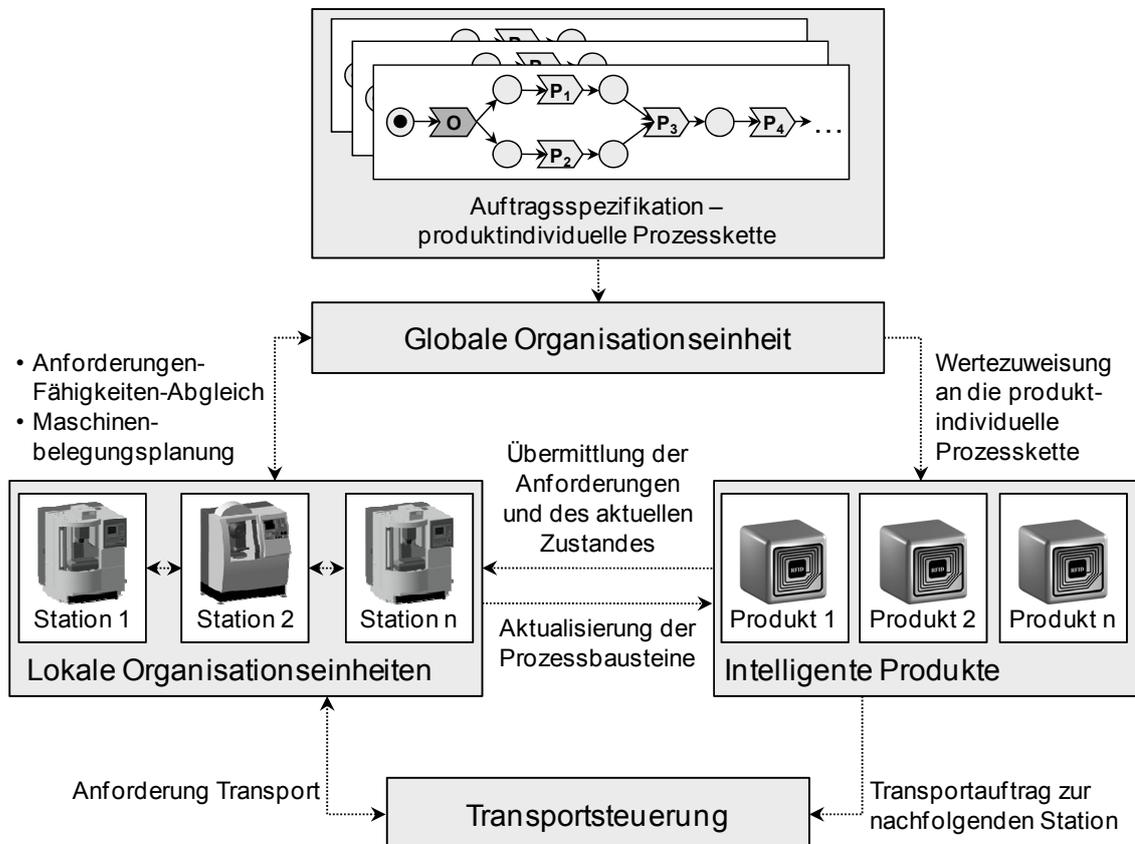


Abbildung 60: Kommunikationsbeziehungen im System zur produktbasierten Steuerung

Für das individuelle Produkt wurde somit ein „Informationsrucksack“ mit initialen Anforderungen definiert, die für die Durchführung der jeweiligen Arbeitsvorgänge relevant sind. Diese Anforderungen können im Verlauf des Wertschöpfungsprozesses schrittweise erweitert bzw. adaptiert werden (z. B. Integration zusätzlicher Arbeitsvorgänge, Aktualisierung produktspezifischer Qualitätsdaten). Die Verantwortung für die lokale Feinplanung (z. B. Reihenfolgebildung) und die zustandsbezogene Steuerung der Aufträge durch die Fertigung (z. B. Handhabung von produkt- oder ressourcenbezogenen Störungen) liegt bei den lokalen Organisationseinheiten und bei der Transportsteuerung. Die Feinplanung in den lokalen Organisationseinheiten basiert auf einer Kommunikation zwischen dem intelligenten Produkt und den entsprechenden Ressourcen sowie auf einer dezentralen Kommunikation zwischen den Arbeitsstationen. Die Transportsteuerung hat die Aufgabe, die intelligenten Produkte gemäß den Vorgaben in der produktindividuellen Prozesskette zwischen den einzelnen Organisationseinheiten zu transportieren. Im Hinblick auf die definierten Rahmenbedingungen in

Abschnitt 1.3 (ab Seite 8) wird in der vorliegenden Arbeit ausschließlich ein automatisierter Materialfluss ohne Störeinflüsse betrachtet.

Durch die Aufteilung der Planungsaufgabe auf mehrere Organisationseinheiten und die Berücksichtigung von produkt- und prozessspezifischen Daten bei der lokalen Feinplanung entstehen mehrere überlagerte Regelmechanismen. Diese Regelmechanismen ermöglichen eine zustandsbezogene und robuste Durchführung von Fertigungs- und Montageabläufen. Im Folgenden werden die Aufgaben des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen beschrieben. Dies umfasst die initiale Ressourcenauswahl und -belegung durch die globale Organisationseinheit, die lokale Feinplanung sowie das Management von ressourcen- und produktbezogenen Störungen.

### **7.4.2 Aufgaben der globalen Organisationseinheit**

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, werden den einzelnen Arbeitsvorgängen eines Fertigungsauftrages weder in der Arbeitsplanung noch in der Produktionsplanung spezifische Maschinen für die Bearbeitung zugewiesen. Zur Sicherstellung einer hohen Systemrobustheit und unter Berücksichtigung des aktuellen Zustandes in der Werkstattebene wird die Ressourcenauswahl unmittelbar vor der Auftragsfreigabe durch die globale Organisationseinheit vorgenommen. In diesem Zusammenhang ergeben sich die folgenden wesentlichen Aufgaben:

- Prüfung der Materialverfügbarkeit
- Auswahl und Belegung von Produktionsressourcen
- Reservierung von Kapazitäten
- Freigabe von Aufträgen in die Fertigung

#### **Prüfung der Materialverfügbarkeit**

Auf Basis der Produktkonfiguration wird im Rahmen der Produktionsplanung der auftragsbezogene Materialbedarf nach Art, Menge und Zeitpunkt ermittelt und reserviert. Im Zuge der Auftragsfreigabe prüft die globale Organisationseinheit abschließend, ob die benötigten Materialien, Komponenten und Hilfsstoffe, die zur Durchführung des betrachteten Produktionsauftrages notwendig sind, zur Verfügung stehen. Sind die benötigten Materialien nicht verfügbar und können nicht hergestellt werden, werden die entsprechenden Aufträge zurückgestellt. Die weiteren Schritte zur Auftragsfreigabe werden erst ausgeführt, wenn die notwendigen Komponenten wieder zur Verfügung stehen.

### Auswahl und Belegung von Produktionsressourcen

Nach der erfolgreichen Prüfung der benötigten Materialien, Komponenten und Hilfsstoffe werden die Produktionsressourcen durch die globale Organisationseinheit ausgewählt. Die Kriterien für die Maschinenauswahl und -belegung sind, mit Ausnahme der technischen Eignung, frei wählbar und können beispielsweise von der aktuellen Belastung der Arbeitssysteme oder den Bearbeitungskosten abhängig sein. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird für den Bereich der Auftragsfertigung insbesondere die Einhaltung der logistischen Zielgröße *Termintreue* angestrebt. Wie in Abschnitt 2.4.2 (ab Seite 20) aufgezeigt, stellt der Bestand im Bereich der Planung und Steuerung von Fertigungsabläufen eine zentrale Regelgröße dar, die u. a. die Termintreue beeinflusst. Aus diesem Grund wird die Untersuchung durch eine Betrachtung der aktuellen Kapazitätsauslastung und der Wirtschaftlichkeit der Bearbeitung ergänzt. Diese Vorgehensweise gewährleistet die zeitgerechte Freigabe von Fertigungsaufträgen und die übergeordnete, initiale Optimierung nach global vorgegebenen Kriterien. In Anlehnung an die Struktur eines Handlungssystem nach ROPOHL (2009) stellt die globale Organisationseinheit bei der Auswahl und Belegung von Produktionsressourcen das *Entscheidungssystem* dar. Die Entscheidungen basieren auf Informationen der lokalen Organisationseinheiten (z. B. Fähigkeiten, Verfügbarkeit, Kosten), die in diesem Zusammenhang als *Informationssystem* genutzt werden (vgl. Abbildung 61).

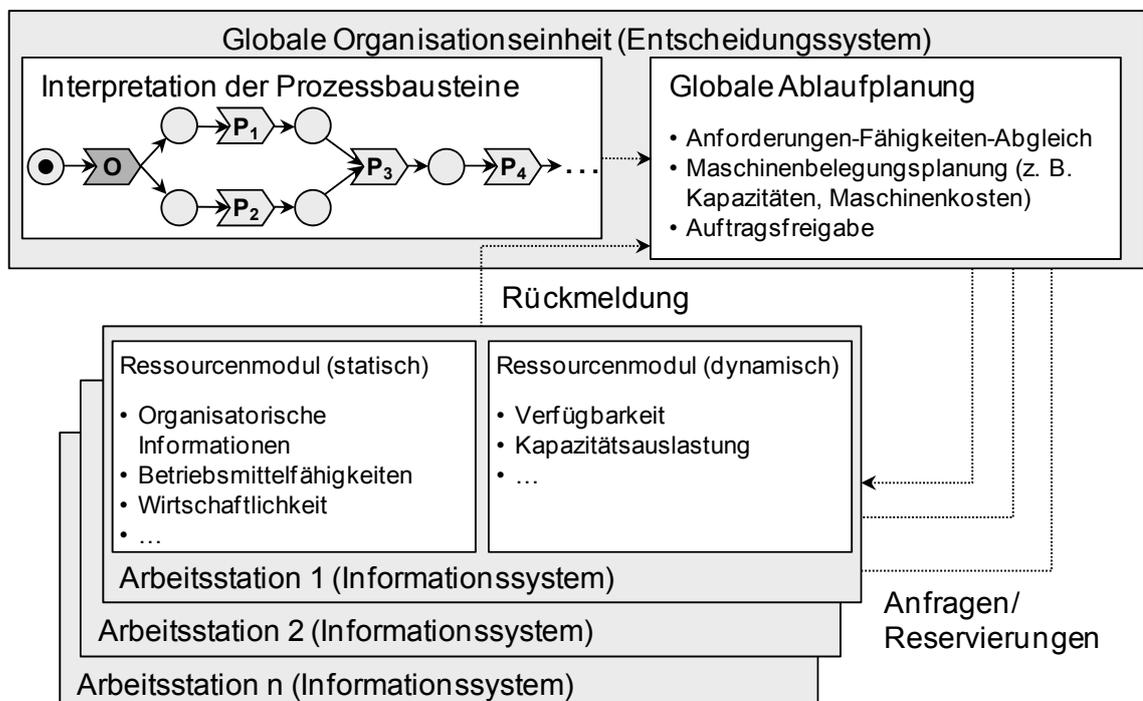


Abbildung 61: Ressourcenauswahl und -belegung mit Hilfe der globalen Organisationseinheit durch die Interpretation von Prozessbausteinen

Im ersten Schritt der Auswahl von Produktionsressourcen wird die *technische Durchführbarkeit* überprüft. In diesem Zusammenhang wird ein formaler Abgleich zwischen den auftragspezifischen Anforderungen und den ressourcenspezifischen Fähigkeiten vorgenommen. Die Grundlage für die Eignungsprüfung bilden die spezifischen Anforderungen der einzelnen Prozessbausteine in der produktindividuellen Prozesskette (vgl. Abschnitt 5.2 ab Seite 84) und das in Abschnitt 5.3 (ab Seite 113) vorgestellte Ressourcenmodul. Neben der strukturierten Darstellung der jeweiligen Fertigungsverfahren enthält der Petri-Netz-basierte Arbeitsplan Informationen zu den Abmessungen und der Geometrie sowie den zulässigen Toleranzen und den Qualitätsanforderungen. Diese produkt- und prozessspezifischen Anforderungen werden den technischen Fähigkeiten der zur Verfügung stehenden Ressourcen gegenübergestellt (vgl. Abbildung 62). Auf diese Weise wird das vorhandene Leistungsangebot an Fertigungsressourcen in der Werkstattebene identifiziert, das für die Bearbeitung des untersuchten Arbeitsvorganges geeignet ist.

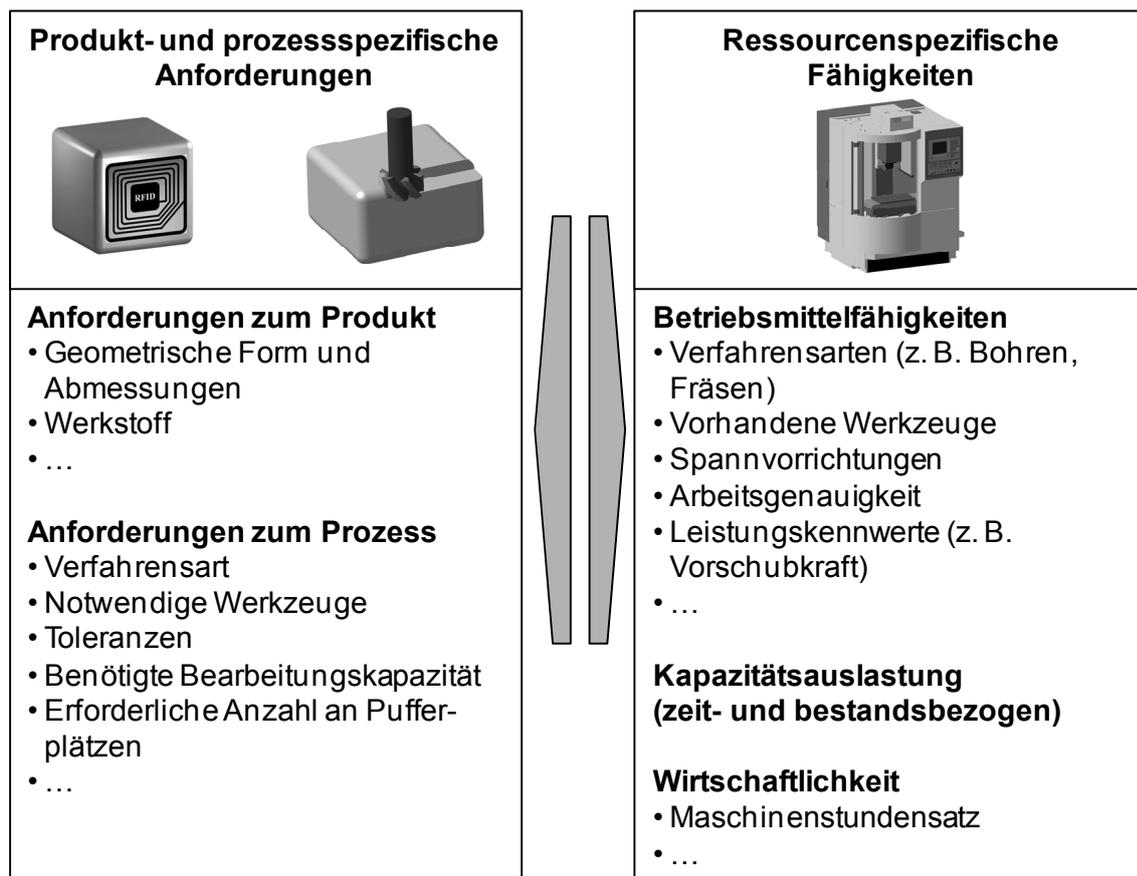


Abbildung 62: Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleich für die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Fertigungs- und Montageressourcen

Nach der Prüfung der technischen Durchführbarkeit erfolgt die *Prüfung des Kapazitätsangebotes*. In diesem Zusammenhang wird der Ressourcenbedarf, der

durch die Bearbeitungszeiten der einzelnen Arbeitsvorgänge vorgegeben ist, dem Ressourcenangebot gegenübergestellt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Auftragsbestand jedes Arbeitssystems auf einem definierten Niveau geregelt, indem ein Grenzwert für die einzuplanenden Aufträge in zeitlicher Hinsicht (Bearbeitungszeit) und unter Berücksichtigung der physischen Lagermöglichkeiten definiert wird. Die gewählte Vorgehensweise soll zum einen die Zielgrößen *Termintreue* und *Durchlaufzeit* positiv beeinflussen. Zum anderen soll die Komplexität bei möglichen Umplanungen von Produktionsabläufen (z. B. Integration zusätzlicher Arbeitsvorgänge, Maschinenausfall) reduziert werden, da die Kapazitätsbelegung der Ressourcen nicht über einen längeren Zeitraum festgelegt wird. Aufgrund der inhomogenen Rahmenbedingungen in der auftragsbezogenen Produktion und der damit verbundenen ungleichmäßigen Durchlaufzeiten der Erzeugnisse (vgl. Abschnitt 1.2 ab Seite 3) ist eine quantitative Festlegung der zeitlichen Bestandsgrenzen nicht möglich. Als qualitative Einflussgröße der Bestandsgrenze kann die Anzahl an redundanten Fertigungsressourcen und die durchschnittliche Bearbeitungszeit an den einzelnen Arbeitssystemen genannt werden.

Bei der auftragsbezogenen Prüfung der zur Verfügung stehenden Fertigungskapazitäten werden sowohl die Bearbeitungszeit als auch die Anzahl der jeweils benötigten Pufferplätze für jedes Arbeitssystem berücksichtigt. Die Verfügbarkeitsabfrage bezieht sich auf die geplante Kapazitätsauslastung, die zum erwarteten Eintreffzeitpunkt des Auftrages am Arbeitssystem vorliegt. Besitzt nur eine geeignete Fertigungsressource freie Kapazitäten, wird diese ausgewählt und dem betrachteten Arbeitsvorgang (Prozessbaustein) zugeordnet. Wird bei der Kapazitätsprüfung festgestellt, dass an mehr als einer Ressource Kapazitäten zur Verfügung stehen, so kann zusätzlich eine *Wirtschaftlichkeitsbetrachtung* für den jeweiligen Arbeitsvorgang vorgenommen werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird hierfür die Maschinenstundensatz-Rechnung genutzt. Mit Hilfe dieses Ansatzes werden sämtliche Fertigungsgemeinkosten eines Betriebsmittels (Instandhaltungs-, Raum- und Energiekosten sowie kalkulatorische Abschreibungen und kalkulatorische Zinsen) auf die entsprechende Nutzungszeit der betrachteten Ressource bezogen (WESTKÄMPER 2006).

### **Reservierung von Kapazitäten**

Nach der qualitativen, quantitativen und kostenbezogenen Auswahl der Produktionsressourcen wird der Kapazitätsbedarf der einzelnen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine dem Bestandskonto der jeweiligen Fertigungsressourcen zugeordnet. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass ein Auftrag nicht zum Zeitpunkt der Kapazitätsreservierung, sondern erst nach der Fertigstellung

der vorhergehenden Arbeitsvorgänge am betrachteten Fertigungs- oder Montagesystem eintrifft. Aus diesem Grund werden die einzelnen Arbeitsvorgänge mengen- und zeitmäßig nicht vollständig in die Bestandskonten der zutreffenden Arbeitsstationen gebucht.

In Anlehnung an die belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA) erfolgt die ressourcenspezifische Kapazitätsreservierung im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit Hilfe eines Abwertungsfaktors (ABFA). In Abhängigkeit des geplanten Eintreffzeitpunktes werden die jeweiligen Arbeitszeiten der indirekten Bestände einem Bestandskonto prozentual zugeordnet. Als indirekter Bestand werden die Aufträge bezeichnet, die noch an vorgelagerten Fertigungsressourcen bearbeitet werden und zu einem späteren Zeitpunkt die betrachtete Arbeitsstation belasten. Die prozentuale Abwertung nimmt mit einem späteren Eintreffzeitpunkt eines Auftrages an der betrachteten Arbeitsstation zu.

Der Abwertungsfaktor wird von der globalen Organisationseinheit mit Hilfe des sogenannten Einlastungsprozentsatzes (*EPS*) berechnet (Gleichung 2). In Anlehnung an WIENDAHL (1997) berücksichtigt der *EPS* die Plandurchlaufzeit eines Arbeitsvorganges an einer Ressource  $n$ . Die Plandurchlaufzeit setzt sich aus der Transportzeit an die Ressource  $n$  ( $TZ_n$ ), der durchschnittlichen Wartezeit an der Ressource  $n$  ( $WZ_n$ ) sowie der Bearbeitungszeit des Arbeitsvorganges an der Ressource  $n$  ( $BZ_n$ ) zusammen. Die Planungsperiode  $P$  wird für die jeweils vorliegenden Rahmenbedingungen individuell festgelegt. Die Spezifizierung von  $P$  ist von den durchschnittlichen Bearbeitungs-, Transport- und Wartezeiten des herzustellenden Produktspektrums abhängig. Die Dauer der Planungsperiode nimmt im Allgemeinen mit sinkenden Bearbeitungs-, Transport- und Wartezeiten ab. Ist das Verhältnis von Durchlaufzeiten und Planungsperiode zu klein, so verliert die Abwertungsmethode an Effektivität, da sich die Einlastungsprozentsätze an den einzelnen Arbeitsstationen nur geringfügig voneinander unterscheiden. Es gilt:

$$EPS_n = \left( 1 + \frac{TZ_n + WZ_n + BZ_n}{P} \right) \times 100 \% \quad (2)$$

mit	$EPS_n$ :	Einlastungsprozentsatz an Ressource $n$
	$TZ_n$ :	Transportzeit von der vorgelagerten Arbeitsstation zur Arbeitsstation mit der Ressource $n$
	$WZ_n$ :	Durchschnittliche Wartezeit an der Arbeitsstation von Ressource $n$
	$BZ_n$ :	Bearbeitungszeit an Ressource $n$

$P$ : Planungsperiode

In Anlehnung an WIENDAHL (1997) ergibt sich der initiale Abwertungsfaktor  $ABFA_{n0}$  einer Ressource  $n$  aus dem Produkt der Abwertungsfaktoren der vorgelagerten Arbeitsstationen gemäß

$$ABFA_{n0} = \prod_{i=1}^{n-1} \frac{100}{EPS_i} \quad (3)$$

mit  $ABFA_{n0}$ : Initialer Abwertungsfaktor an Ressource  $n$

Im Rahmen der Kapazitätsreservierung werden die Bearbeitungszeiten mit einem reduzierten Anteil in die Bestandskonten der jeweiligen Ressourcen gebucht. Die abgewertete Bearbeitungszeit  $BZ_{n\_ab}$  der Ressource  $n$  ergibt sich aus dem Produkt der tatsächlichen Bearbeitungszeit und des Abwertungsfaktors der Ressource  $n$ . Die Reservierung der benötigten Pufferplätze erfolgt analog.

Es gilt:

$$BZ_{n\_ab} = BZ_n \times ABFA_{n0} \quad (4)$$

mit  $BZ_{n\_ab}$ : Abgewertete Bearbeitungszeit an Ressource  $n$

$BZ_n$ : Bearbeitungszeit an Ressource  $n$

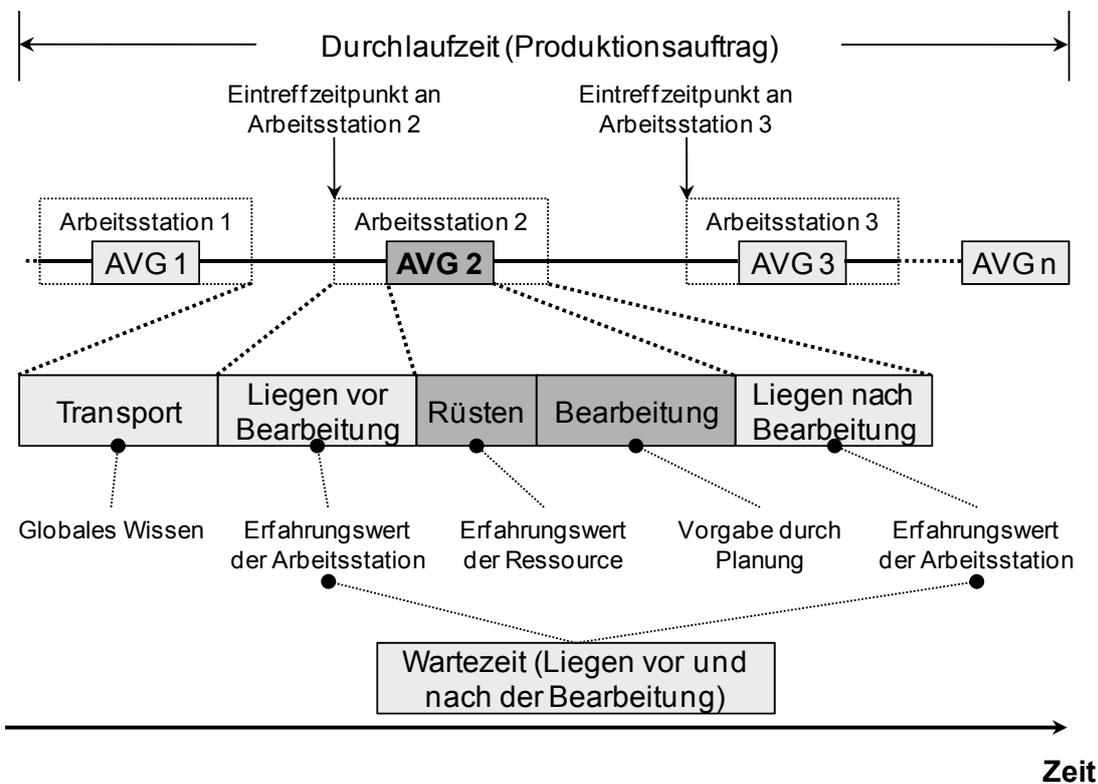
Die Reservierung der (abgewerteten) Bearbeitungszeiten und der (abgewerteten) Pufferplätze wird für jeden Arbeitsvorgang durchgeführt. Die globale Organisationseinheit löst für die einzelnen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine ein Reservierungsobjekt aus, welches der priorisierten Fertigungsressource zugeordnet ist. Das Reservierungsobjekt enthält die folgenden Informationen:

- Auftrags-Identifikationsnummer (Auftrags-ID)
- Geplante Bearbeitungszeit für den durchzuführenden Arbeitsvorgang (Plan-Durchführungszeit)
- Anzahl der benötigten Pufferplätze
- Geplanter Eintreffzeitpunkt des Auftrages an der Arbeitsstation
- Abwertungsfaktor
- Liefertermin des fertigen Produktes

Bei der Reservierung der Kapazitäten werden keine festen Bearbeitungszeiten für die einzelnen Arbeitsvorgänge festgelegt. Dadurch werden den lokalen Organisationseinheiten zum einen Freiräume bei der Feinplanung und Optimierung

von Arbeitsabläufen eingeräumt. Zum anderen können produkt- und ressourcenbezogene Störungen, wie beispielsweise auftretende Verzögerungen im Fertigungsdurchlauf oder zusätzliche Arbeitsvorgänge durch Nacharbeiten, bei der Auftragsdurchführung ohne umfangreiche Planänderungen berücksichtigt werden.

Der geplante Eintreffzeitpunkt an einer Arbeitsstation ergibt sich aus der Summe der Einzeldurchlaufzeiten der vorherigen Arbeitsvorgänge. Aufgrund der Teilautonomie der lokalen Organisationseinheiten und der zustandsbezogenen Planung kann die Ankunft eines Produktes an einer Arbeitsstation nur näherungsweise berechnet werden. In Anlehnung an die Definition der Durchlaufzeit in Abschnitt 2.4.2.3 (ab Seite 22) setzen sich die Zeitanteile aus den Transport-, Rüst-, Bearbeitungs- und durchschnittlichen Wartezeiten zusammen (vgl. Abbildung 63).



**Legende:**

AVG: Arbeitsvorgang

Abbildung 63: Ausschnitt aus einem exemplarischen Ablaufplan mit den Eintreffzeitpunkten und den zugehörigen Durchlaufzeitanteilen

Die Bearbeitungszeit ist für jeden Arbeitsvorgang durch die Prozessplanung vorgegeben und kann bei der Berechnung der Durchlaufzeit berücksichtigt werden. Die lokalen Entscheidungsfreiräume und die daraus resultierenden Freiheitsgrade bei der Reihenfolgeplanung ermöglichen keine auftragspezifische Berücksichti-

gung der Rüstzeiten bei der Reservierung der Kapazitäten durch die globale Organisationseinheit. Aus diesem Grund werden die *Rüstzeiten* bei der Berechnung des Auftragsdurchlaufes als durchschnittliche, ressourcenbezogene Erfahrungswerte genommen. Die Rüstzeiten bilden zusammen mit den Bearbeitungszeiten die Plan-Durchführungszeit. Die durchschnittliche *Wartezeit* an einer Station umfasst sowohl die Zeiteile vor einer Bearbeitung als auch nach der Fertigstellung eines Arbeitsvorganges. Die Wartezeit ist ein spezifischer Erfahrungswert der lokalen Organisationseinheit, der sich aus Vergangenheitswerten zusammensetzt und kontinuierlich angepasst wird. Dieser Wert ist u. a. vom durchschnittlichen lokalen Auftragsbestand, der Anzahl von Ressourcen und Handhabungseinrichtungen pro Arbeitsstation sowie der Diversität des Produktionsprogramms abhängig. Die *Transportzeit* kann aufgrund des im Rahmen dieser Arbeit betrachteten automatisierten Materialflusses zwischen den vorhandenen Stationen vorhergesagt werden. Diese Zeiten stehen der globalen Organisationseinheit in Form einer Transportmatrix zur Verfügung.

Ausgehend vom initialen Abwertungsfaktor  $ABFA_{n0}$  und der abgewerteten Bearbeitungszeit  $BZ_{n,ab}$  nimmt der reservierte Kapazitätsbedarf nach der Auftragsfreigabe bis zum Eintreffen des Werkstückes an der betrachteten Arbeitsstation über die Zeit  $t$  linear zu (vgl. Abbildung 64). Bei Ankunft eines Auftrages an der betrachteten Arbeitsstation beträgt der Abwertungsfaktor 1 und die benötigte Arbeitszeit ist zu 100 % in das Bestandskonto der Ressource gebucht. Nach der erfolgreichen Durchführung eines Arbeitsvorganges und dem Verlassen der Station wird die reservierte Kapazität wieder gelöscht.

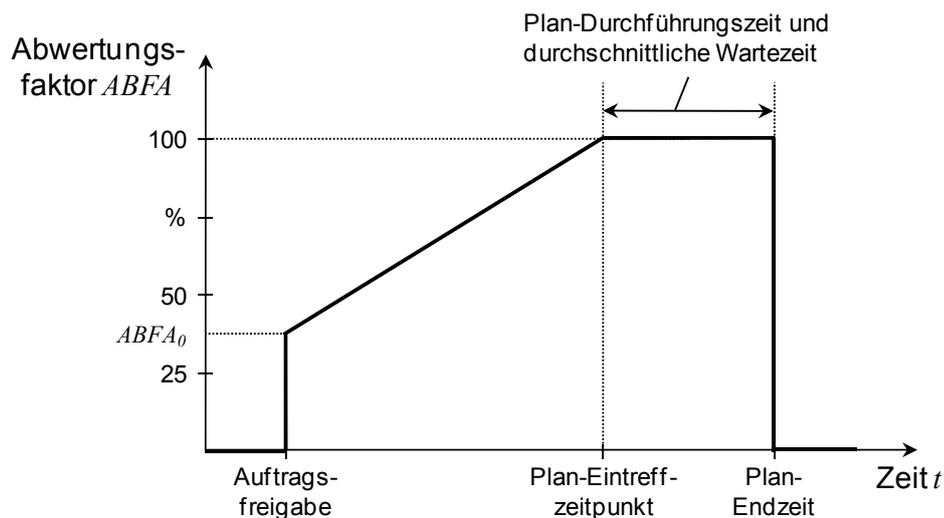


Abbildung 64: Zeitlicher Verlauf des linearen Abwertungsfaktors für einen Auftrag an der Ressource  $n$

### Freigabe von Aufträgen in die Fertigung

Nach der Ressourcenauswahl und der Reservierung der entsprechenden Kapazitäten erfolgt im letzten Schritt die Freigabe von Aufträgen in die Fertigung. In diesem Zusammenhang wird die ressourcenneutrale Beschreibung der produktindividuellen Prozesskette durch Informationen, die sich aus dem Planungsdurchlauf der globalen Organisationseinheit ergeben haben, ergänzt. Die Detaillierung der Informationen in der produktindividuellen Prozesskette sowie in den einzelnen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteinen umfasst die folgenden Elemente:

- Priorisierung möglicher alternativer Arbeitsvorgänge (Alternativ-Struktur) bzw. Bearbeitungsreihenfolgen (Ergänzungs-Struktur) im Petri-Netz (vgl. Abschnitt 5.2 ab Seite 84);
- Ausgewählte Ressource für jeden Arbeitsvorgang;
- Priorisierte Liste mit alternativen Ressourcen, die einen spezifischen Arbeitsvorgang durchführen können;

Die produktindividuelle Prozesskette wird mit den maschinenbezogenen Informationen in der erweiterten PNML-Struktur (vgl. Abschnitt 5.2.7.5 ab Seite 109) auf dem RFID-Transponder hinterlegt. Das intelligente Produkt besitzt somit die initialen Anforderungen an seinen Wertschöpfungsprozess und den hierfür notwendigen Routenplan. Den lokalen Organisationseinheiten können somit alle notwendigen produkt- und prozessspezifischen Daten für die zustandsbezogene Durchführung der entsprechenden Arbeitsvorgänge kommuniziert werden. Aus Sicht der globalen Organisationseinheit und unter Berücksichtigung der aktuellen Rahmenbedingungen gibt der Routenplan zum Zeitpunkt der Auftragsfreigabe den optimalen Arbeitsablauf wieder. Um auf mögliche Störungen im Ablauf kurzfristig reagieren zu können, besteht die Möglichkeit zur Umleitung des Produktes an die festgelegten Alternativressourcen oder die Nutzung der durch das Petri-Netz zugelassenen Freiheitsgrade (Alternativ- und Ergänzungs-Struktur). Der detaillierte Ablauf bei produkt- und ressourcenbezogenen Störungen wird in Abschnitt 7.4.4 beschrieben.

Nach der Auslagerung aller benötigten Materialien und Komponenten sowie der Hinterlegung der produktindividuellen Prozesskette auf dem entsprechenden RFID-Transponder endet die Zuständigkeit der globalen Organisationseinheit für den betrachteten Auftrag. Die lokalen Organisationseinheiten übernehmen anschließend die Verantwortung für die korrekte Durchführung der einzelnen Arbeitsvorgänge. Nach der erfolgreichen Fertigstellung eines Produktes wird der Auftrag bei der Einlagerung als *abgeschlossen* an die globale Organisationsein-

heit und die dahinterliegenden betrieblichen Planungs- und Informationssysteme zurückgemeldet.

### 7.4.3 Aufgaben der lokalen Organisationseinheiten

Nach der Festlegung der organisatorischen Rahmenbedingungen und eines initialen Auftragsdurchlaufes durch die globale Organisationseinheit wird der benötigte Kapazitätsbedarf an die entsprechenden lokalen Organisationseinheiten übermittelt. Die zugehörigen Reservierungsobjekte mit organisatorischen Informationen zur Auftragsdurchführung dienen als Zielvorgaben, die bei der Feinplanung an den jeweiligen Fertigungs- und Montagestationen zu berücksichtigen sind. Um den Anforderungen hinsichtlich einer hohen Flexibilität und kurzer Reaktionszeiten gegenüber Planabweichungen und unvorhergesehenen Ereignissen gerecht zu werden (vgl. Kapitel 3), müssen in Ergänzung hierzu aktuelle produkt- und prozessspezifische Daten sowie ressourcenbezogene Informationen in die lokale Ablaufplanung integriert werden. Die Arbeitsstationen erhalten aus diesem Grund Freiheitsgrade bei der Feinplanung und der Durchführung von Arbeitsvorgängen. Diese Struktur führt dazu, dass eine lokale Organisationseinheit im Rahmen der Auftragsdurchführung sowohl als Informations- als auch als Entscheidungssystem agiert. In Anlehnung an ROPOHL (2009) werden die beiden genannten Elemente durch das Ausführungssystem ergänzt, in dem die stofflichen und energetischen Prozesse durchgeführt werden (vgl. Abbildung 65).

Das *Informationssystem* stellt die Eingangsgrößen für die lokale Planung bereit, die auf den folgenden Daten aufsetzt:

- Reservierungsobjekte der globalen Organisationseinheit;
- Auftragsbezogene Informationen von anderen Arbeitsstationen, die zu einer Anpassung von Reservierungsobjekten führen (z. B. verzögerte Ankunft von Aufträgen) (vgl. Abschnitt 7.4.4);
- Aktuelle produkt- und prozessspezifische Daten der produktindividuellen Prozesskette, die durch die intelligenten Produkte bereitgestellt werden;

Das *Entscheidungssystem* legt die lokalen Stellgrößen fest (vgl. Abschnitt 2.4.4 ab Seite 27). Als Grundlage hierfür dienen zum einen die Daten aus dem Informationssystem und zum anderen die sogenannten Planungsfunktionen. Diese berücksichtigen die Zielgrößen der globalen Organisationseinheit (z. B. Liefertermin), die um zusätzliche lokale Zielgrößen (z. B. Minimierung der Rüstkosten) ergänzt werden können. Die jeweiligen Planungsfunktionen werden den lokalen Organisationseinheiten in individuellen Planungsbibliotheken bereitgestellt



- Systemspezifische Konfiguration der Arbeitsstation und der zugehörigen Ressourcen (vgl. Abschnitt 5.3 ab Seite 113)
- Aufbau einer lokalen Bibliothek zur Planung und Optimierung von Produktionsabläufen (z. B. Schlupfzeit, Ablaufoptimierung in der Montage)
- Definition einer zeitlichen Bestandsgrenze
- Festlegung einer physischen Bestandsgrenze (Anzahl der Pufferplätze)
- Hinterlegung der Kostensätze einer Arbeitsstation (z. B. Rüstkosten, Maschinenkosten)

Die lokale Feinplanung hinsichtlich der global festgelegten Zielvorgaben (z. B. Termintreue) findet in einem ersten Schritt mit Hilfe der organisatorischen Informationen, die in den Reservierungsobjekten hinterlegt sind (vgl. Abschnitt 7.4.2), statt. Dieses Vorgehen ermöglicht die Berücksichtigung von direkten und indirekten Beständen an einer Arbeitsstation. Fertigungsressourcen können somit gezielt für hoch priorisierte Aufträge freigehalten werden. Für die abschließende Festlegung der lokalen Stellgrößen, die Berücksichtigung von weiteren Zielgrößen (z. B. Rüstkostenminimierung) und die Referenzierung auf aktuelle bauteilbezogene Informationen für den Fertigungsablauf müssen die Daten des intelligenten Produktes in die Feinplanung integriert werden.

Nach dem Eintreffen eines Bauteils an einer Arbeitsstation werden die produkt- und die prozessspezifischen Daten an die lokale Feinplanung übertragen. Durch die Interpretation der produktindividuellen Prozesskette mit den organisatorischen und arbeitsvorgangsbezogenen Anforderungen (verfahrens- und ablaufspezifischer Baustein) sowie dem Produktzustand (dokumentationsbezogener Baustein) wird der detaillierte Fertigungsablauf für den betrachteten Arbeitsvorgang geplant. Die Feinplanung wird somit zu einem Zeitpunkt durchgeführt, an dem die meisten Informationen zur Aufgabenstellung und zum aktuellen Zustand des Produktes vorliegen. Die Berücksichtigung von Prognosefehlern (z. B. Eintreffzeitpunkt) oder Störungen (z. B. zusätzliche Arbeitsvorgänge) resultiert in einer zustandsbezogenen Prioritäten- und Reihenfolgebildung an den einzelnen Fertigungs- und Montagestationen. Da von der globalen Organisationseinheit keine festen Bearbeitungsreihenfolgen und Bearbeitungstermine für die einzelnen Arbeitsvorgänge vorgegeben werden, kann es bei der Planung auf Arbeitsstations-ebene zu keinen Abweichungen kommen. In Anlehnung an das in Abschnitt 2.4.4 (ab Seite 27) vorgestellte Modell zur Fertigungssteuerung existieren in den lokalen Organisationseinheiten somit die Regelgrößen *Rückstand* und *Reihenfolgeabweichung* nicht. Die produktbasierte Steuerung von Fertigungsabläufen ist daher insbesondere durch eine Kommunikation zwischen intelligenten Produkten

und Ressourcen bzw. zwischen den einzelnen Ressourcen in der Werkstattebene gekennzeichnet.

Nach der erfolgreichen Durchführung und dem Abschluss eines Arbeitsvorganges werden die produktspezifischen Informationen im dokumentationsbezogenen Baustein aktualisiert. Gleichzeitig wird der Bearbeitungsstatus des entsprechenden verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteins auf *ok* gesetzt. In Abhängigkeit der Struktur des Petri-Netzes werden im Anschluss ein Prozessbaustein oder mehrere Prozessbausteine auf den Status *aktiv* gesetzt und sind somit für die weitere Bearbeitung freigeschaltet. Die Informationen dienen als Grundlage für den Transport des intelligenten Produktes an die nachfolgende Arbeitsstation.

### **7.4.4 Management von produkt- und ressourcenbezogenen Störungen**

Insbesondere im Bereich der Auftragsfertigung ist die Durchlaufzeit abhängig vom aktuellen Produktionsprogramm, der Auslastung der Ressourcen, der Reihenfolgebildung an den einzelnen Arbeitsstationen sowie möglichen produkt- und ressourcenbezogenen Störungen. Dies bedeutet, dass eine detaillierte Planung durch die globale Organisationseinheit nicht möglich ist und die unvermeidlich auftretenden Planänderungen im Wertschöpfungsprozess, die durch Prognosefehler und Störungen hervorgerufen werden, echtzeitnah identifiziert und im weiteren Verlauf der Auftragsabwicklung berücksichtigt werden müssen. In diesem Zusammenhang kann die Durchsetzung von Aufträgen in der Fertigungsebene als geschlossener Regelkreis abgebildet werden. Die einzelnen Planungssysteme der lokalen Organisationseinheiten stellen jeweils einen Regler dar, während die Maschinen und Anlagen in der Werkstattebene als Regelstrecke aufgefasst werden können (Abbildung 66).

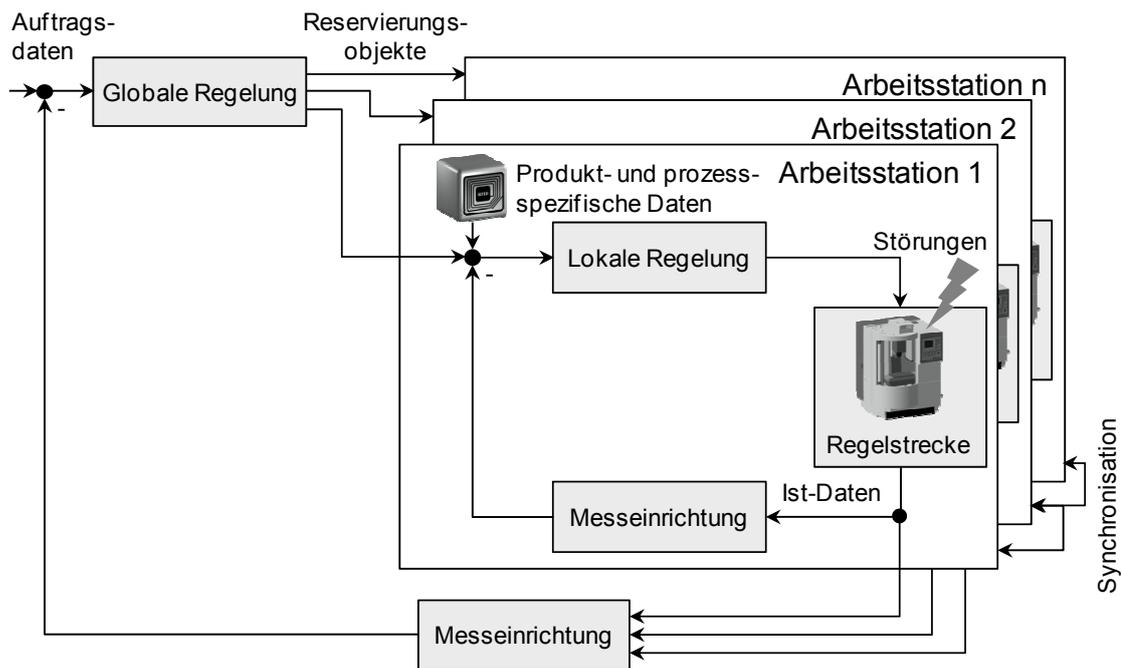


Abbildung 66: Regelkreis der Produktionssteuerung (in Anlehnung an SIMON 1995, BRINZER 2005)

Eine wichtige Voraussetzung für die Durchführung einer zustandsbezogenen Feinplanung an den einzelnen Arbeitsstationen ist die lokale Auftragsüberwachung mit einer regelmäßigen Synchronisation der terminlichen Situation zwischen den einzelnen Organisationseinheiten. Dies umfasst einen stationsbezogenen Soll-/Ist-Abgleich (Messeinrichtung) der initial angenommenen Bearbeitungs-, Rüst- und Wartezeiten sowie der resultierenden Eintreffzeitpunkte. Durch die zeitliche Veränderlichkeit der reservierten Kapazitäten in den Bestandskonten haben unvorhergesehene Ereignisse in vorgelagerten Arbeitsabschnitten Auswirkungen auf die Kapazitätsauslastung der betrachteten Arbeitsstation. Dies kann zu einem sprunghaften Anstieg (frühere Ankunft) bzw. zu einer Reduzierung (verzögerte Ankunft) der entsprechenden Kapazitäten im Bestandskonto führen (vgl. Abbildung 67). Als Gründe hierfür können beispielsweise veränderte Liegezeiten durch eine lokale Optimierung, zusätzliche Arbeitsvorgänge durch eine unzureichende Produktqualität oder ein Ressourcenausfall genannt werden. Durch die echtzeitnahe und dynamische Anpassung der Reservierungsobjekte in den lokalen Organisationseinheiten (z. B. Eintreffzeitpunkt eines Auftrages) werden Prognosefehler und Störungen ausgeglichen. Für die Feinplanung an den einzelnen Arbeitsstationen bedeutet dies, dass eine zustandsbezogene Festlegung der Stellgrößen (z. B. Bearbeitungsreihenfolge) auf Basis aktueller Planungsdaten durchgeführt werden kann.

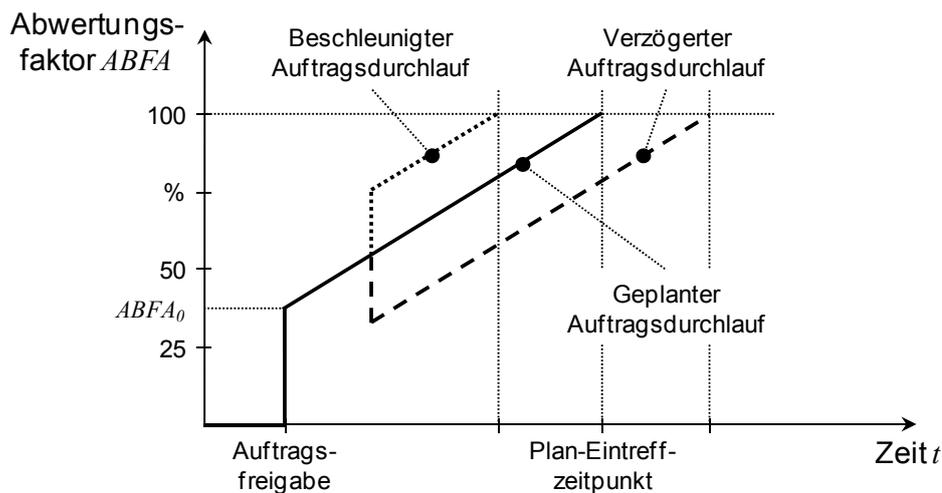


Abbildung 67: Veränderung des Abwertungsfaktors bei einer Beschleunigung oder einer Verzögerung von Aufträgen

Neben der terminlichen Synchronisation der Reservierungsobjekte kann durch ungeplante Ereignisse im Wertschöpfungsprozess eine Adaption des Fertigungs- und des Montageablaufes notwendig werden. Die resultierenden Abweichungen gegenüber dem ursprünglichen Planungsablauf können durch den Ausfall von Ressourcen oder eine unzureichende Produktqualität hervorgerufen werden. Diese Störungen haben in den meisten Fällen eine unmittelbare Auswirkung auf den Wertschöpfungsprozess und die Ressourcenbelegung. Die Umlagerung von Arbeitsvorgängen auf andere Arbeitsstationen, zusätzliche Arbeitsvorgänge (z. B. Nacharbeit) oder Eilaufträge führen zu zusätzlichen Kapazitätsbelastungen in der Werkstattebene.

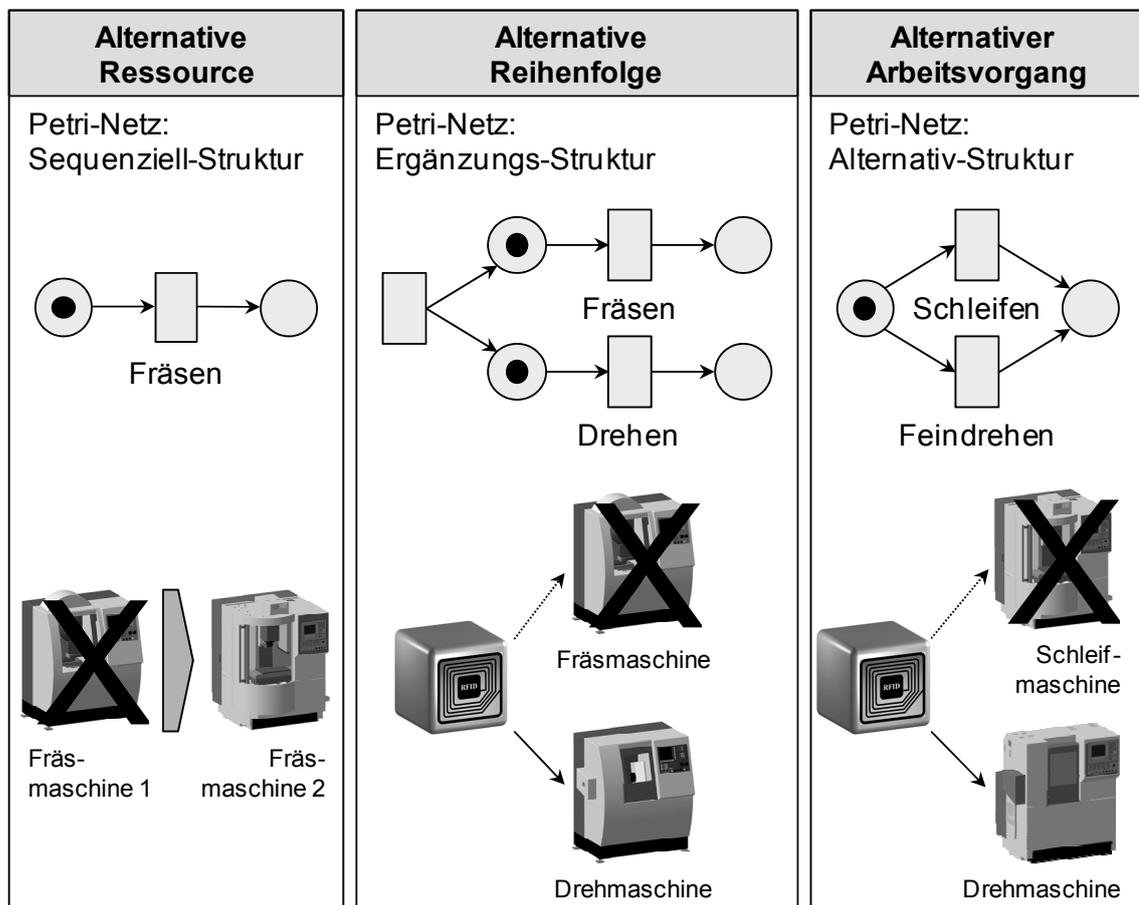
Die Grundlage für die effiziente Reaktion auf *organisatorische oder ablaufbezogene Störungen* bilden zum einen die Informationen in der produktindividuellen Prozesskette des intelligenten Produktes (z. B. alternative Ressource, alternativer Arbeitsvorgang). Bei einer *unzureichenden Produktqualität* werden zum anderen Handlungsanweisungen durch das wissensbasierte System bereitgestellt (vgl. Kapitel 6), die in einer Anpassung der produktindividuellen Prozesskette resultieren. Im Folgenden werden die organisatorischen Abläufe bei ressourcen- und produktbezogenen Störungen detailliert.

### Ressourcenbezogene Störungen

Im Falle einer ressourcenbezogenen Störung werden, in Abhängigkeit der voraussichtlichen Störungsdauer, die entsprechenden Arbeitsstationen in der Werkstattebene benachrichtigt (Broadcast-Mechanismus). Eine notwendige Anpassung des Fertigungsablaufes wird von den Arbeitsstationen durchgeführt, an denen sich die betroffenen Werkstücke zum Zeitpunkt der Störungsmeldung befinden.

den. In diesem Zusammenhang werden die Störungsmeldungen und die produktindividuellen Prozessketten, in denen die jeweiligen Bearbeitungsressourcen hinterlegt sind, analysiert. Aufgrund der Petri-Netz-basierten Beschreibung des Arbeitsplans stehen, im Fall einer ressourcenbezogenen Störung, die folgenden Möglichkeiten für die Adaption des Fertigungsablaufes zur Verfügung (vgl. Abbildung 68):

- Belegung von alternativen Ressourcen, die im verfahrens- und ablaufspezifischen Baustein hinterlegt sind;
- Nutzung von Reihenfolgealternativen in der produktindividuellen Prozesskette (Ergänzungs-Struktur);
- Auswahl eines alternativen Arbeitsvorganges in der produktindividuellen Prozesskette (Alternativ-Struktur);



**Legende:**

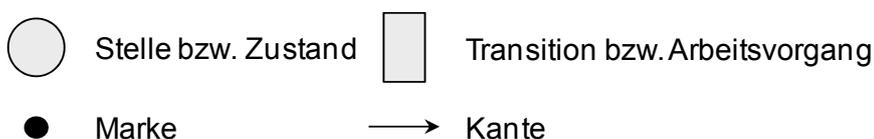
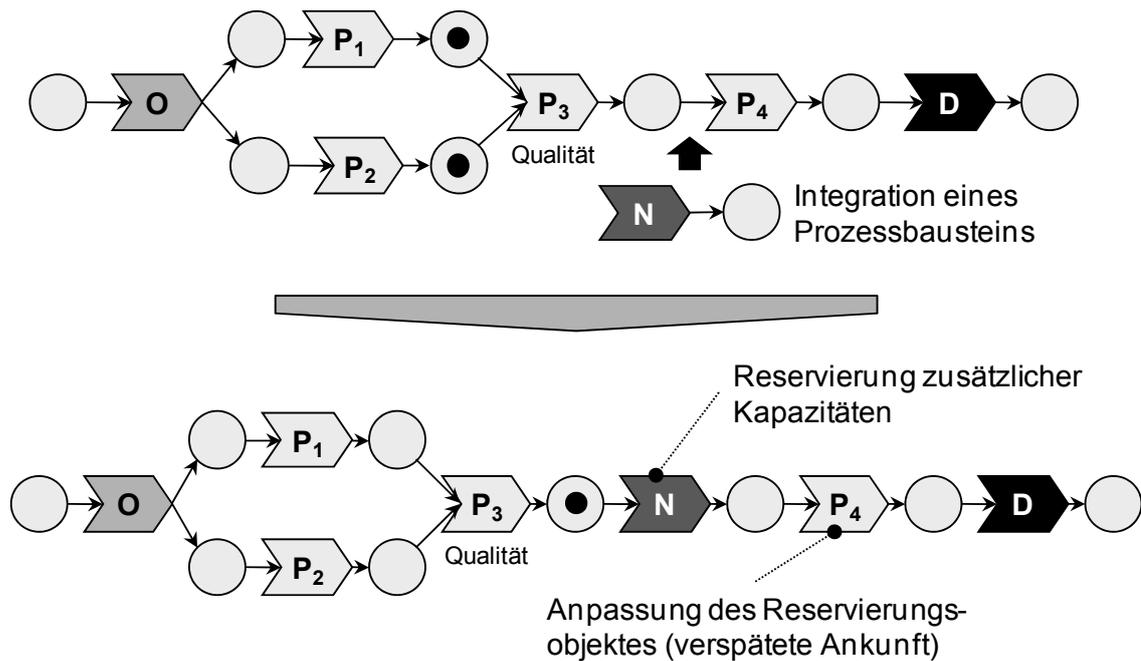


Abbildung 68: Handlungsmöglichkeiten bei einer ressourcenbezogenen Störung

Mit Hilfe der produkt- und der prozessspezifischen Informationen und der genannten Freiheitsgrade prüft die verantwortliche lokale Organisationseinheit eine Umlagerung des betrachteten Auftrages. Im Fall der erfolgreichen Umplanung werden die benötigten Kapazitäten in die Konten der entsprechenden Arbeitsstationen gebucht (Reservierungsobjekt). Gleichzeitig werden die Informationen hinsichtlich des geänderten Produktionsablaufes und der ausgewählten Ressourcen in den jeweiligen Prozessbausteinen der produktindividuellen Prozesskette angepasst. Durch eine Kommunikation zwischen dem intelligenten Produkt und der Transportsteuerung wird das Bauteil auf Basis der modifizierten Daten automatisch an die alternativen Arbeitsstationen umgeleitet. Können die ursprünglichen Planvorgaben aufgrund mangelnder Alternativen oder nicht zur Verfügung stehender Kapazitäten nicht adaptiert werden, erfolgt der Transport des Werkstückes in ein Zwischenlager. In diesem Fall wird die Zuständigkeit für die technische Auftragsabwicklung an die globale Organisationseinheit übergeben. Gleichzeitig werden die Reservierungsobjekte an den nachfolgenden Arbeitsstationen des betrachteten Auftrages gelöscht. Die globale Organisationseinheit versucht in regelmäßigen Abständen eine erneute Auftragsfreigabe der verbleibenden Arbeitsvorgänge durchzuführen. Die Maschinenbelegung, die Kapazitätsreservierung und die Auftragsfreigabe laufen dabei nach der in Abschnitt 7.4.2 beschriebenen Vorgehensweise ab.

### **Produktbezogene Störungen**

Eine unzureichende Qualität eines Produktes führt dazu, dass der Fertigungs- bzw. der Montageablauf entweder durch zusätzliche Arbeitsvorgänge (Nacharbeit) ergänzt oder durch die Ausschleusung des Produktes aus dem Produktionsprozess abgebrochen werden muss. Bei der Durchführung einer Qualitätsprüfung werden relevante Produktausprägungen mit Hilfe eines wissensbasierten Systems beurteilt und entsprechende Handlungsmaßnahmen abgeleitet (vgl. Kapitel 6). Die beiden Fälle resultieren in einer organisatorischen und ablaufspezifischen Anpassung des weiteren Produktionsablaufes (Abbildung 69).

**Legende:**

	Organisationsbezogener Baustein		Verfahrens- und ablaufspezifischer Baustein
	Dokumentationsbezogener Baustein		Nacharbeitsbaustein

Abbildung 69: Integration eines zusätzlichen Arbeitsvorganges in die produktindividuelle Prozesskette

Im Fall einer Nacharbeit werden die zusätzlichen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine, die durch das wissensbasierte System abgeleitet wurden, in die produktindividuelle Prozesskette eingefügt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt die Integration der Nacharbeitsbausteine immer in einer Sequenziell-Struktur zum vorhergehenden Qualitätsbaustein. Eine ganzheitliche Optimierung des Petri-Netzes hinsichtlich der Position des Nacharbeitsganges wird nicht betrachtet.

Die abgeleiteten Prozessbausteine haben die gleiche Struktur wie die regulären verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine der produktindividuellen Prozesskette (vgl. Abschnitt 5.2 ab Seite 84). Ergänzend hierzu erhalten diese zusätzlich noch eine Liste mit möglichen Ressourcen, welche die spezifizierten Nacharbeitsoperationen durchführen können. Diese Daten bilden die Grundlage für die dezentrale Kapazitätsprüfung und -reservierung durch die Qualitätsstation. In Anlehnung an die terminliche Synchronisation werden die nachfolgenden Arbeitsstationen über das verspätete Eintreffen des betrachteten Auftrages informiert. Durch die zusätzlichen Transport-, Bearbeitungs- und Wartezeiten können

die Reservierungsobjekte der betroffenen Stationen angepasst werden. In Abhängigkeit der Verzögerung führt dies wiederum zu einem Rückgang der reservierten Kapazitäten (Abbildung 67 auf Seite 158). Die zusätzlichen Arbeitsvorgänge und die resultierende verlängerte Durchlaufzeit des Auftrages führen dazu, dass das betroffene Werkstück bei der zustandsbezogenen Reihenfolgebildung an den nachfolgenden Arbeitsstationen mit einer erhöhten Priorität berücksichtigt wird. Können die zusätzlichen Arbeitsvorgänge aufgrund der zur Verfügung stehenden Kapazitäten und Maschinen nicht ausgeführt werden, so wird das Werkstück in einem Zwischenlager abgelegt. Wie bei der Handhabung von ressourcenbezogenen Störungen wird die Zuständigkeit für die weitere Auftragsbearbeitung an die globale Organisationseinheit übergeben. Die verbliebenen Reservierungsobjekte an den lokalen Arbeitsstationen werden gelöscht.

Für den Fall, dass ein Werkstück nicht nachbearbeitet werden kann, wird der Qualitätsbaustein auf *nok* (Arbeitsvorgang nicht erfolgreich beendet) gesetzt. Das Produkt wird aus dem Wertschöpfungsprozess ausgeschleust. Gleichzeitig wird die globale Organisationseinheit benachrichtigt, um einen neuen Auftrag mit den identischen auftragsspezifischen Daten zu generieren. Dieser hat in der Regel eine geringe Zeitspanne bis zum Liefertermin und wird daher sowohl bei der Auftragsfreigabe als auch bei der Bearbeitung an den jeweiligen Arbeitsstationen priorisiert behandelt.

### 7.5 Fazit

Im vorliegenden Kapitel wurde die Organisationsstruktur für das System zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen entwickelt. Um die Vorteile einer zentralen Koordination bei gleichzeitiger Gewährleistung einer hohen Reaktionsfähigkeit durch dezentrale Entscheidungsfreiräume zu nutzen, wurde eine hybride Organisationsstruktur als Grundlage gewählt. Die zeit-, orts- und qualitätsgerechte Bereitstellung der notwendigen produkt- und prozessspezifischen Daten wird durch eine Kopplung des Informationsflusses an die Erzeugnisse in der Fertigung und in der Montage sichergestellt. Die produktindividuelle Prozesskette, die gemäß dem in Kapitel 5 vorgestellten Datenmodell hergeleitet werden kann, wird auf dem intelligenten Produkt der zweiten Klasse hinterlegt. Sie bildet die Basis für die produktzustandsbezogene Durchführung des Wertschöpfungsprozesses. In diesem Zusammenhang wurden die Möglichkeiten einer zentralen Datenbereitstellung in einem Netzwerk und der dezentralen Datenhaltung am Werkstück diskutiert.

Im Rahmen der Auftragsfreigabe weist die globale Organisationseinheit den einzelnen Arbeitsvorgängen im ressourcenneutralen, Petri-Netz-basierten Arbeitsplan spezifische Maschinen in der Werkstattebene zu. Dies umfasst zum einen die Sicherstellung der technischen Durchführbarkeit durch einen Abgleich der produkt- und der prozessspezifischen Anforderungen mit den ressourcenspezifischen Fähigkeiten. Durch den bestehenden Ansatz können zum anderen weitere Kriterien, wie z. B. die aktuelle Kapazitätsauslastung und die Wirtschaftlichkeit der Bearbeitung, aufwandsarm berücksichtigt werden. Um kurze Durchlaufzeiten und eine hohe Termintreue zu gewährleisten, wird in der vorliegenden Arbeit zusätzlich eine bestandsgeregelte Freigabe von Aufträgen betrachtet. Unter Berücksichtigung der aktuellen Zustände in der Produktion erstellt die globale Organisationseinheit zum Zeitpunkt der Auftragsfreigabe einen optimalen Fertigungs- und Montageablauf. In Anlehnung an die belastungsorientierte Auftragsfreigabe (BOA) erfolgt die ressourcenspezifische Kapazitätsreservierung mit einer prozentualen Abwertung, die bis zur Ankunft des Werkstückes auf 100 % ansteigt. Das intelligente Produkt erhält anschließend einen „Informationsrucksack“ mit den initialen Anforderungen und Spezifikationen an seinen Wertschöpfungsprozess. Mit Hilfe dieser Informationen und der Ergänzung durch zusätzliche, produktspezifische Daten steuert sich das Werkstück durch die Fertigung und die Montage.

An den Arbeitsstationen in der Werkstattebene, welche die lokalen Organisationseinheiten darstellen, wird, unter Berücksichtigung der produkt- und der prozessspezifischen Daten des Werkstückes, eine Feinplanung durchgeführt. Diese zustandsbezogene Planung basiert auf Planungsfunktionen, die in lokalen Bibliotheken bereitgestellt werden. Bei der lokalen Feinplanung werden die global festgelegten Zielgrößen (z. B. Termintreue) berücksichtigt, die u. U. durch weitere, stationsspezifische Zielgrößen (z. B. Rüstkosten, Ablaufoptimierung) ergänzt sein können. Durch eine dezentrale Kommunikation zwischen den einzelnen Arbeitsstationen können Prognosefehler und auftretende Änderungen im Fertigungsdurchlauf (z. B. Eintreffzeitpunkt) frühzeitig kommuniziert werden. Bei einer unzureichenden Erzeugnisqualität werden mögliche Handlungsmaßnahmen mit dem wissensbasierten System, das in Kapitel 6 entwickelt wurde, abgeleitet. Der nachfolgende Fertigungs- und Montageablauf wird mit Hilfe der hybriden Organisationsstruktur angepasst. Die Verteilung des Steuerungsaufwandes ermöglicht somit eine nachhaltige Auftragssteuerung und die Berücksichtigung von individuellen Auftragszielen, welche eine bessere Erreichung der logistischen Zielgrößen zur Folge hat.

Im nachfolgenden Kapitel wird zum einen die technische Machbarkeit des Systems durch eine prototypische Umsetzung der einzelnen Bestandteile an einer

realen Demonstrationsanlage nachgewiesen. Zum anderen wird mit Hilfe einer simulationstechnischen Validierung ein quantitativer Beleg über den Nutzen und die Leistungsfähigkeit des Systems erbracht.

## **8 Umsetzung und Validierung**

### **8.1 Übersicht**

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Teilelemente des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen entwickelt. Der Inhalt des vorliegenden Kapitels ist die Umsetzung und Validierung des Forschungsansatzes. In Abschnitt 8.2 wird zunächst die prototypische Realisierung des Systems und die Integration in eine produktionstechnische Versuchsanlage beschrieben. Nach dem Aufzeigen der technischen Machbarkeit wird im nachfolgenden Abschnitt 8.3 durch eine simulationstechnische Validierung auf den Nutzen und die Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems eingegangen. Zum Abschluss des Kapitels erfolgt in Abschnitt 8.4 eine Bewertung.

### **8.2 Hardwaretechnische Umsetzung**

#### **8.2.1 Beschreibung der Modellfabrik und der verwendeten Hardware**

Für die Integration des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen wurde eine Demonstrationsplattform genutzt, welche aus den praxistypischen Elementen einer industriellen Produktion besteht. Die Anlage (vgl. Abbildung 70) umfasst zwei Fertigungsstationen, eine automatisierte, robotergetriebene Montagestation sowie ein System zur Lagerung von Roh-, Halbfertig- und Fertigerzeugnissen. Die einzelnen Arbeitsstationen der vollautomatisierten Produktionsanlage sind durch ein Palettentransportsystem miteinander verbunden. Wie in Kapitel 7 erläutert, entspricht eine Arbeitsstation jeweils einer lokalen Organisationseinheit, die aus mehreren Ressourcen oder Arbeitsplätzen bestehen kann. Der Aufbau einer Fertigungsstation mit den zugehörigen Ressourcen ist beispielhaft in Abbildung 71 dargestellt. Der Roboter dient zur Handhabung der Werkstücke zwischen einer Arbeitsstation und dem Transportsystem sowie zur automatisierten Be- und Entladung der Werkzeugmaschinen. Unter Berücksichtigung der produkt- und prozessspezifischen Daten wird die stationsbezogene Feinplanung und Optimierung von Arbeitsvorgängen und -abläufen durch die jeweiligen lokalen Organisationseinheiten durchgeführt.

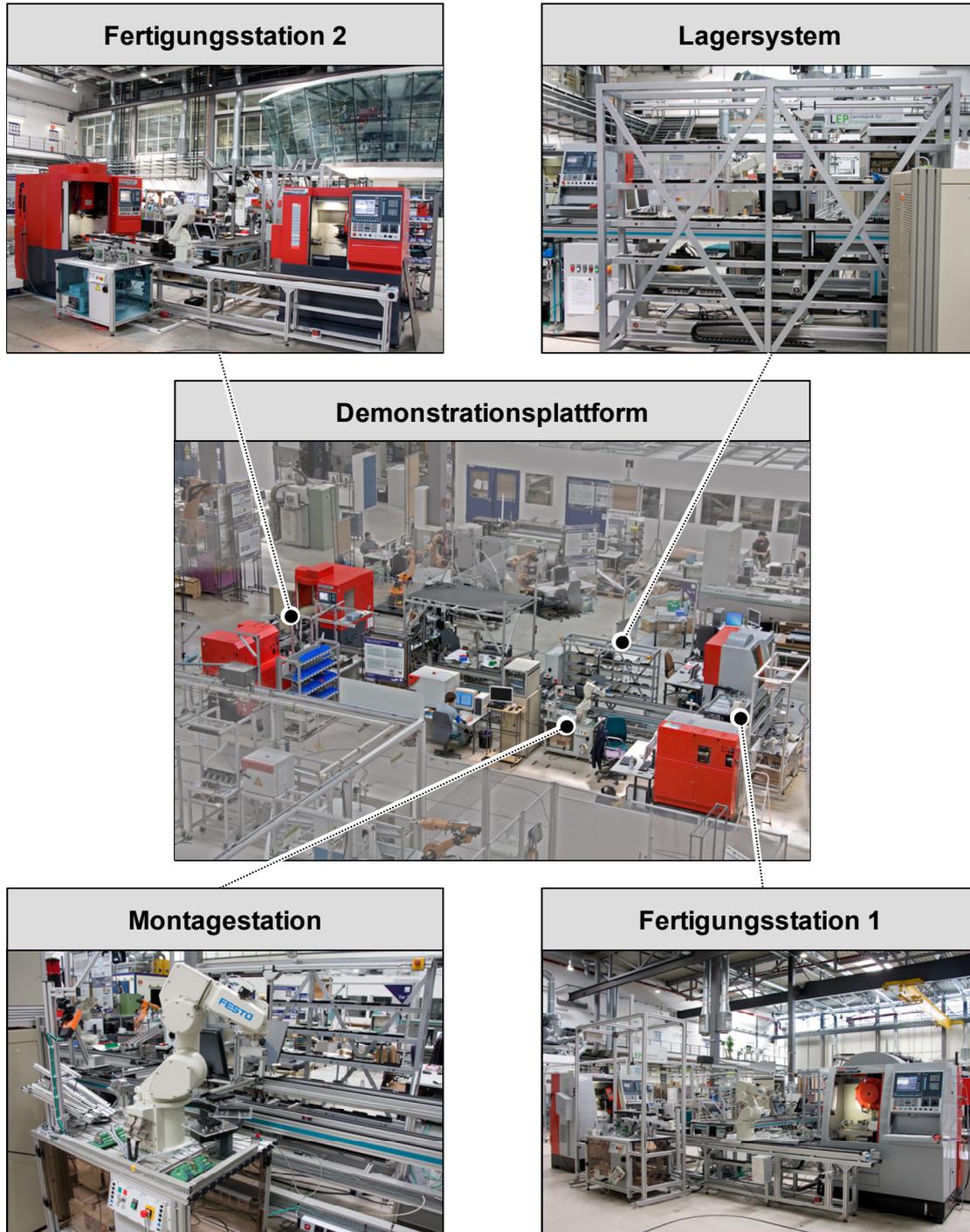


Abbildung 70: Demonstrationsplattform mit den einzelnen Fertigungs- und Montagestationen (Fotos: G. Sigl, iwb)

Um das individuelle Produkt als zusätzliches Element zur Steuerung der Produktion zu integrieren, ist jede Arbeitsstation und jede Haltestelle im Transportsystem mit einem RFID-System ausgestattet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde hierfür die HF-RFID-Technologie mit einer Betriebsfrequenz von 13,56 MHz verwendet.

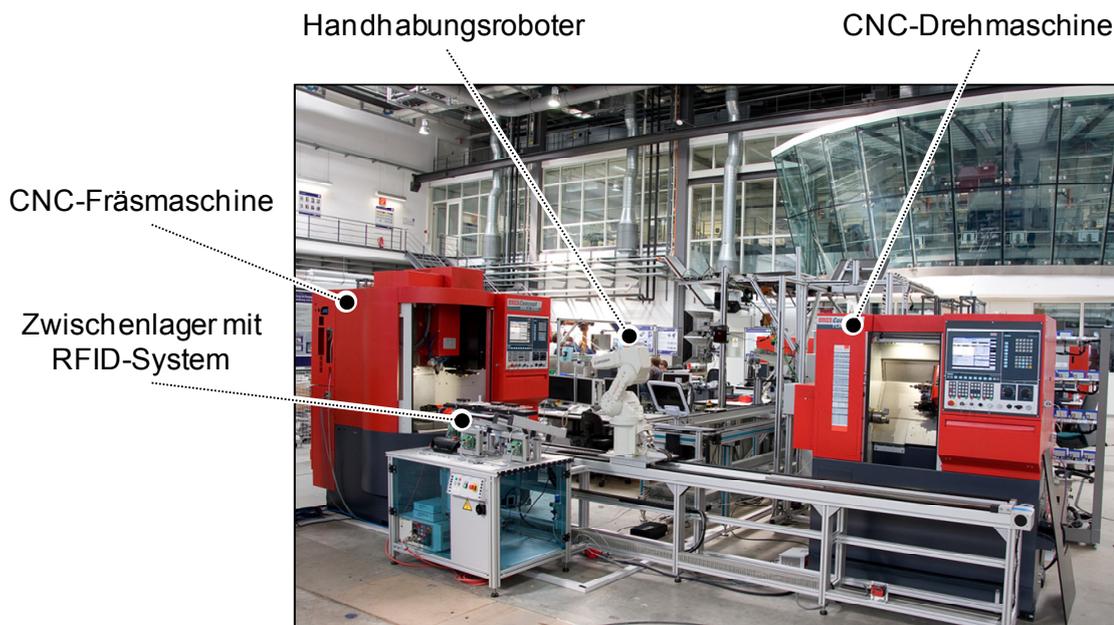


Abbildung 71: Übersicht der Ressourcen an einer Fertigungsstation (Foto: G. Sigl, iwb)

Da die Transportprozesse nicht global koordiniert werden, ermöglicht der Einsatz der RFID-Systeme an den einzelnen Haltestellen und Weichen die Selbststeuerung des Werkstückes durch die Fertigung. Dies erfolgt durch das Auslesen der auftragspezifischen Anforderungen (Zielstation) und einen Abgleich mit dem aktuellen Standort.

Zur Berücksichtigung der produkt- und prozessspezifischen Daten bei der Feinplanung besitzt auch jede Arbeitsstation ein RFID-System. Der Lesebereich des RFID-Systems deckt die jeweils zur Verfügung stehenden Pufferplätze vollständig ab. Um eine eindeutige Zuordnung zwischen den Werkstücken, den zugehörigen produktspezifischen Daten und den Lagerplätzen zu gewährleisten, ist der Lese- und Schreibprozess mit induktiven Sensoren gekoppelt, die unter jedem Pufferplatz befestigt sind. Mit Hilfe der induktiven Sensoren kann somit eine Zustandsänderung im System festgestellt werden, die beispielsweise durch die Ankunft einer neuen Palette gekennzeichnet ist. Durch eine anschließende Inventur des Lesebereiches können neue Transponder erkannt und die zugehörigen produkt- und prozessspezifischen Daten dem entsprechenden Pufferplatz eindeutig zugeordnet werden. Für den Fall, dass eine Organisationseinheit nur aus einer wertschöpfenden Ressource besteht (z. B. Montagestation), wird nur ein RFID-System an der entsprechenden Stationshaltestelle verwendet.

Für die prototypische Umsetzung wurde als Beispielprodukt ein einstufiges Zahnradgetriebe gewählt, welches aus den in Abbildung 72 dargestellten Komponenten besteht. Die einzelnen Bauteile werden jeweils in verschiedenen Vari-

anten angeboten, die hinsichtlich der geometrischen Dimensionen und der zu fertigenden Formelemente divergieren. Für jede Produktvariante sind daher unterschiedliche Anforderungen in Bezug auf die Arbeitsinhalte und die Arbeitsumfänge zu berücksichtigen. Dies führt dazu, dass die produktspezifischen Arbeitspläne und die zugehörigen Produktionsabläufe nicht übereinstimmen.



Abbildung 72: Komponenten des Beispielproduktes Getriebe (Foto: G. Sigl, iwb)

Um eine produktzustandsbezogene Durchführung von einzelnen Arbeitsvorgängen und des gesamten Fertigungsablaufes zu ermöglichen, sind die einzelnen Komponenten mit jeweils einem RFID-Transponder ausgestattet. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden hierfür mobile HF-Datenträger mit einer Kunststoffummantelung und einer Speichergröße von 8 kByte verwendet.

### 8.2.2 Architektur und Anwendung des Softwaresystems

#### 8.2.2.1 Allgemeines

Nachdem der Aufbau der produktionstechnischen Versuchsanlage vorgestellt wurde, werden im Folgenden der softwaretechnische Aufbau und die Anwendung des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen erläutert. Die Ausführungen gliedern sich in die vorbereitende Konfigurationsphase und die Ausführungsphase. In der Konfigurationsphase werden die einzelnen Prozessbausteine mit der zugehörigen produktindividuellen Prozesskette sowie den Maschinen und Anlagen in der Werkstattebene modelliert. In der Ausführungsphase werden die Aufgaben der globalen und der lokalen Organisationseinheiten unter Berücksichtigung von produktbezogenen Störungen betrachtet.

### 8.2.2.2 Konfigurationsphase

Eine essentielle Voraussetzung für die Nutzung des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen ist zum einen die Modellierung von Produktionsabläufen und zum anderen die formale Beschreibung der zur Verfügung stehenden Stationen und Ressourcen. Als Grundlage hierfür dient das Datenmodell für adaptive Produktionssysteme, welches in Kapitel 5 vorgestellt wurde.

#### Modellierung von Produktionsabläufen

Die produktindividuelle Prozesskette besteht aus einzelnen Prozessbausteinen, die in ein Petri-Netz eingefügt werden. Die Arbeitsplanung, welche die einzelnen Arbeitsvorgänge und den Durchlauf eines Werkstückes durch die Fertigung beschreibt, ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Aus diesem Grund müssen die einzelnen Prozessbausteine und der Produktionsablauf mit den zugehörigen Zwangsreihenfolgen und planerischen Freiheitsgraden manuell erstellt werden.

Der *organisationsbezogene Baustein* enthält allgemeine Informationen, die für die Auftragsdurchführung und die Terminplanung notwendig sind. Mit Ausnahme der allgemeinen, auftragsunabhängigen Informationen zu einem Erzeugnis (z. B. Produkt-Nr., Produktname) werden die organisatorischen bzw. auftragsabhängigen Daten (z. B. Auftrags-Nr., Liefertermin) im Verlauf der Produktionsplanung bzw. der Auftragsfreigabe automatisiert im organisationsbezogenen Baustein hinterlegt.

Für jeden Arbeitsvorgang ist ein einzelner *verfahrens- und ablaufspezifischer Baustein* anzulegen. In den Bausteinen werden zunächst ressourcenneutral die notwendige Verfahrensart, die Bearbeitungsdaten, arbeitsvorgangsbezogene Plandaten sowie technologie- und geometriebezogene Informationen hinterlegt. Der Bearbeitungsstatus wird in jedem verfahrens- und ablaufspezifischen Baustein auf *naktiv* (nicht bereit für die Bearbeitung) gesetzt. Die betriebsmittellorientierten Informationen (z. B. Ressourcen-Nr., alternative Ressourcen) werden im Rahmen der Auftragsfreigabe in den jeweiligen Prozessbausteinen automatisiert abgelegt.

Der aktuelle Erzeugniszustand und die zugehörigen Eigenschaften werden mit Hilfe des *dokumentationsbezogenen Bausteins* beschrieben. Vor der Auftragsfreigabe werden dort die charakteristischen Merkmale des Rohmaterials gespeichert. Im Verlauf des Wertschöpfungsprozesses werden diese Daten entweder durch die Plan-Informationen in den verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteinen oder durch die Daten der Qualitätsprüfung sukzessive ergänzt.

Die Wohlgeformtheit und Gültigkeit der verschiedenen Ausprägungen von Prozessbausteinen wird jeweils mit Hilfe von XML-Schemata (XSD) sichergestellt. Die einzelnen XML-Schemata wurden mit dem *Oxygen XML-Editor*<sup>®</sup> generiert. Zur aufwandsarmen Befüllung von individuellen Prozessbausteinen wurden darauf aufbauend für jede Bausteinausprägung Formulare mit dem Softwarewerkzeug *Microsoft InfoPath*<sup>®</sup> erstellt.

Nach der Beschreibung der einzelnen Arbeitsvorgänge müssen im Anschluss die Zwangsreihenfolgen und strukturelle Freiheitsgrade (Ergänzungs- und Alternativ-Struktur) im Produktionsablauf abgebildet werden. Für die Modellierung des Petri-Netzes wurde der Petri-Netz-Editor *WoPeD* (Workflow Petri Net Designer) genutzt. Dieses frei zugängliche Softwarewerkzeug ermöglicht die grafische Modellierung und Analyse von Petri-Netzen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden neben den verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteinen auch der organisationsbezogene (erste Transition) und der dokumentationsbezogene Baustein (letzte Transition) im Petri-Netz abgebildet. Für die weitere Verwendung des Petri-Netzes erlaubt *WoPeD* den Export in die XML-basierte Dokumentenbeschreibungssprache PNML.

Die einzelnen Bausteine, die jeweils in XML-Dokumenten abgelegt sind, müssen anschließend manuell in das Petri-Netz integriert werden. In diesem Zusammenhang werden die entsprechenden Transitionen der PNML-basierten Beschreibung um das Element *<Baustein>* erweitert. Die modellierten Prozessbausteine werden in den nachfolgenden Kindelementen abgelegt (vgl. Abbildung 46).

### **Abbildung von Ressourcenfähigkeiten**

Die Klassifizierung und Beschreibung der Fertigungsmaschinen und Arbeitsplätze ist eine wichtige Grundlage für die Einbindung von Ressourcen in ein Produktionssystem mit zustandsbezogener Maschinenbelegung. Das statische Ressourcenwissen, welches beispielsweise die benötigten Kommunikationsadressen und Betriebsmittelfähigkeiten enthält, wird dem Produktionssystem in einer XML-Konfigurationsdatei bereitgestellt (vgl. Kapitel 5). Wie bei der Modellierung der einzelnen Prozessbausteine basiert die Stations- und Maschinenbeschreibung auf einer XML-Schemadefinition, die mit dem Softwarewerkzeug *Oxygen XML-Editor*<sup>®</sup> erstellt wurde. Der Aufbau einer spezifischen Station mit den zugehörigen Ressourcen und Fähigkeiten wird mit Hilfe eines Formulars, welches mit *Microsoft InfoPath*<sup>®</sup> generiert wurde und auf einem XML-Schema basiert, wiedergegeben. In Abbildung 51 auf Seite 119 ist eine Stations- und Ressourcenbeschreibung beispielhaft dargestellt.

### 8.2.2.3 Ausführungsphase

#### Umsetzung der globalen Organisationseinheit

Die ressourcenneutrale Beschreibung der produktindividuellen Prozessketten und die Konfiguration der zur Verfügung stehenden Maschinen und Anlagen sind Grundlage für die produktbasierte Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen. Abbildung 73 visualisiert den softwaretechnischen Aufbau der globalen und der lokalen Organisationseinheiten in einer vereinfachten UML-Notation.

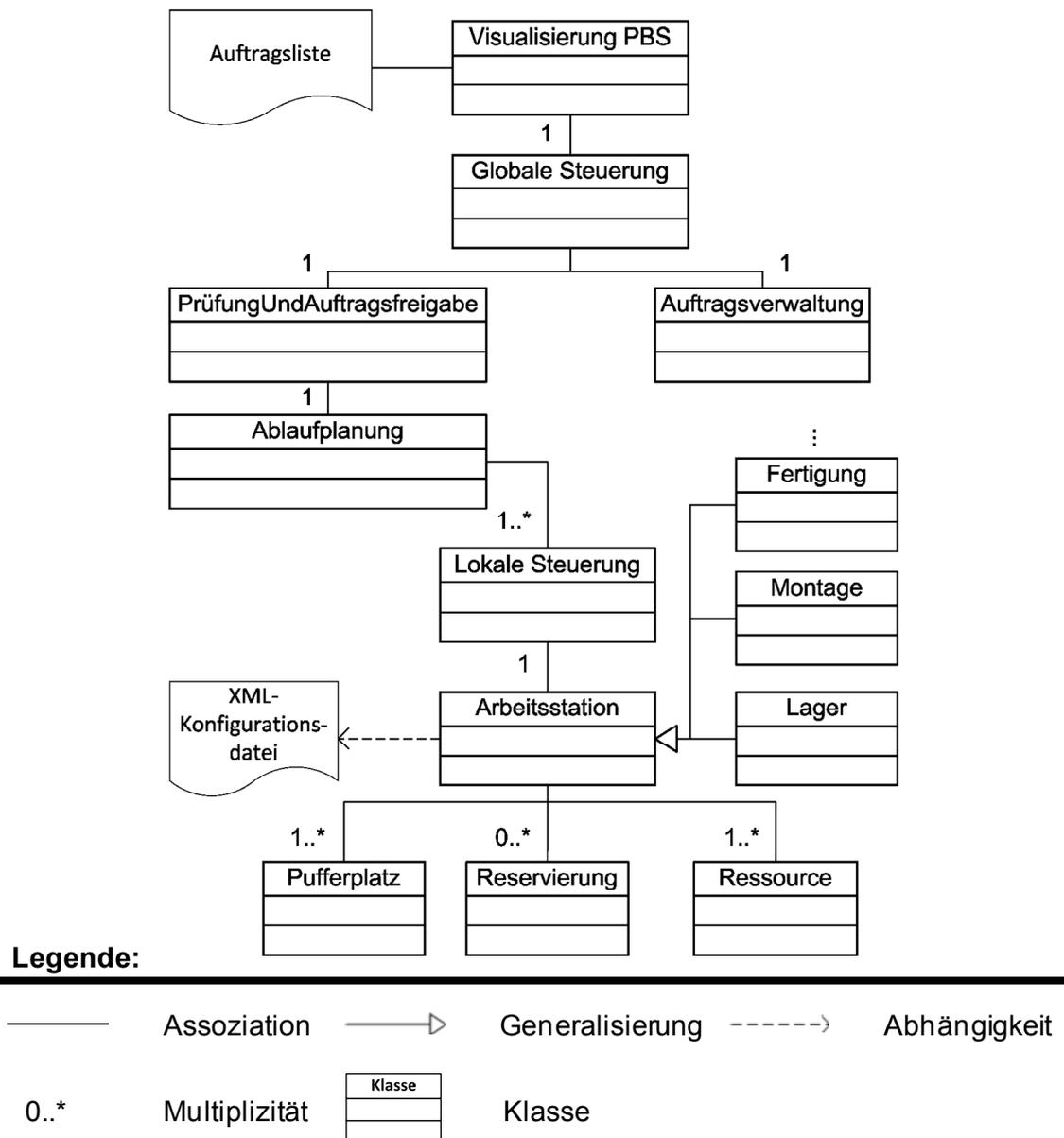


Abbildung 73: Statisches Klassendiagramm der globalen und der lokalen Organisationseinheit in UML-Schreibweise

Das System zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen wurde in C# mit der Softwareumgebung *Microsoft Visual Studio® 2005* und *Microsoft Visual Studio® 2010* entwickelt. Wie in Kapitel 7 erläutert, erstellt die globale Organisationseinheit zum Zeitpunkt der Auftragsfreigabe einen initialen Ablaufplan und hinterlegt diesen auf dem intelligenten Produkt. Die Benutzeroberfläche der globalen Organisationseinheit ermöglicht die Eingabe, Verwaltung und Überwachung des Produktionsprogramms (Abbildung 74). Im bestehenden Prototypensystem kann die Auftragsliste der globalen Organisationseinheit entweder manuell über eine Auswahlliste zusammengestellt (Klasse *Visualisierung PBS*) oder über eine Softwareschnittstelle von einem Planungssystem, welches nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, importiert werden. Die produktindividuellen Prozessketten der jeweiligen Produkttypen, die in der Konfigurationsphase generiert wurden, sind im System hinterlegt.

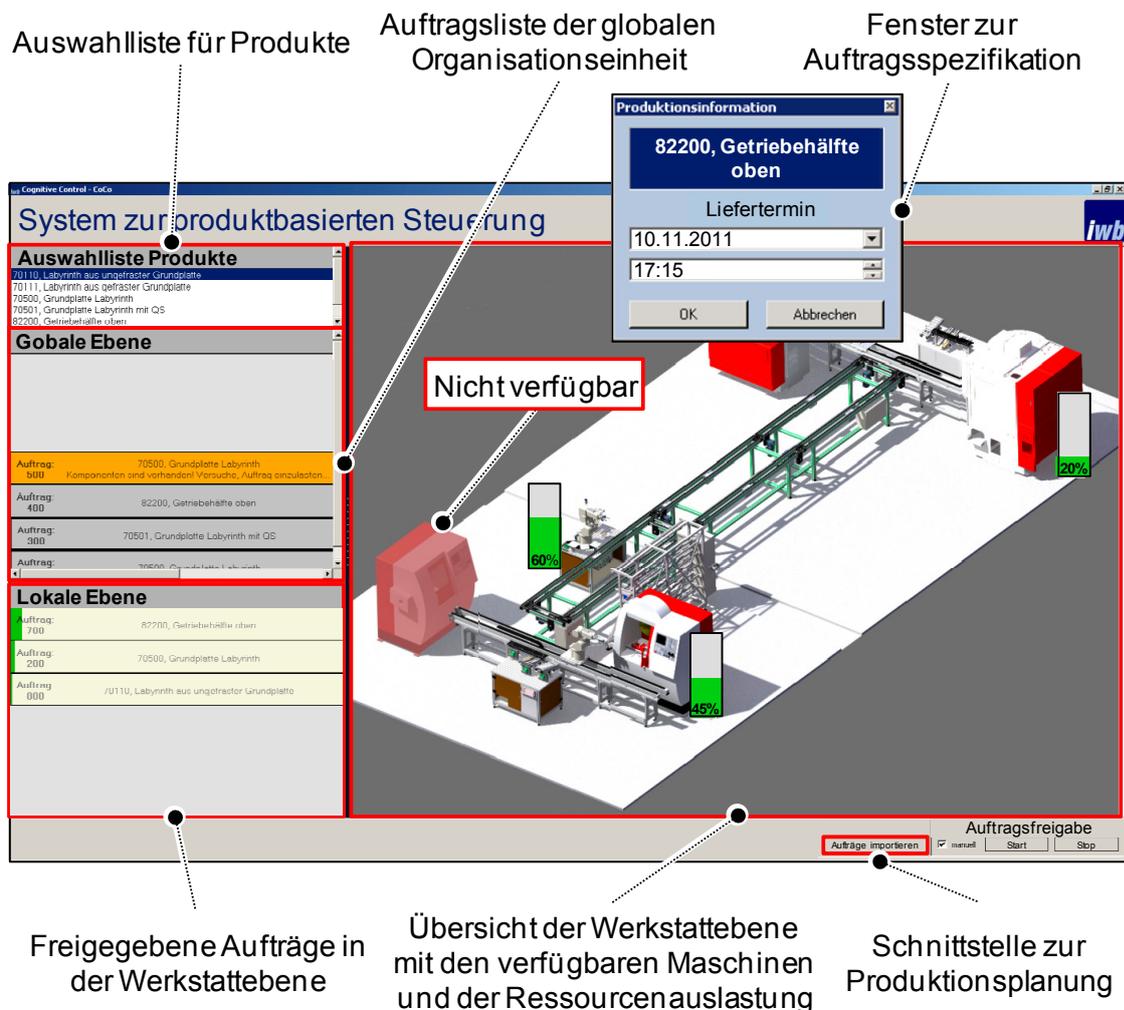


Abbildung 74: Benutzeroberfläche der globalen Organisationseinheit zur Eingabe, Verwaltung und Überwachung von Produktionsaufträgen

Die Priorisierung der Aufträge in der globalen Organisationseinheit wird in der Klasse *Auftragsverwaltung* durchgeführt (vgl. Abbildung 73 auf Seite 171). Zunächst wird der auftragsbezogene Materialbedarf, der in der produktindividuellen Prozesskette hinterlegt ist, mit dem vorhandenen Material im Lagersystem, das in einer Datenbank verwaltet ist, abgeglichen. Danach werden die einzelnen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine in der produktindividuellen Prozesskette hinsichtlich ihrer Anforderungen analysiert und den Fähigkeiten der Ressourcen, die in der XML-Konfigurationsdatei gespeichert sind, gegenübergestellt (Klasse *PrüfungUndAuftragsfreigabe*). Dieser technische Abgleich für die Maschinenbelegung wird durch eine Betrachtung der Verfügbarkeit, der Kapazitätsauslastung und der Bearbeitungskosten ergänzt. Die entsprechenden Informationen, die für die Ressourcenauswahl erforderlich sind, werden in dezentralen Datenbanken, die den einzelnen Arbeitsstationen zugeordnet sind, verwaltet. Die globale Organisationseinheit richtet hierfür über die Klasse *Ablaufplanung* Anfragen an die lokalen Organisationseinheiten und erhält die zugehörigen Rückgabewerte. Die entsprechenden Anfragen werden jeweils in der Klasse *Lokale Steuerung* bearbeitet. Die Entscheidung über den initialen Produktionsablauf und die Freigabe werden abschließend durch die Klasse *Ablaufplanung* von der globalen Organisationseinheit getroffen.

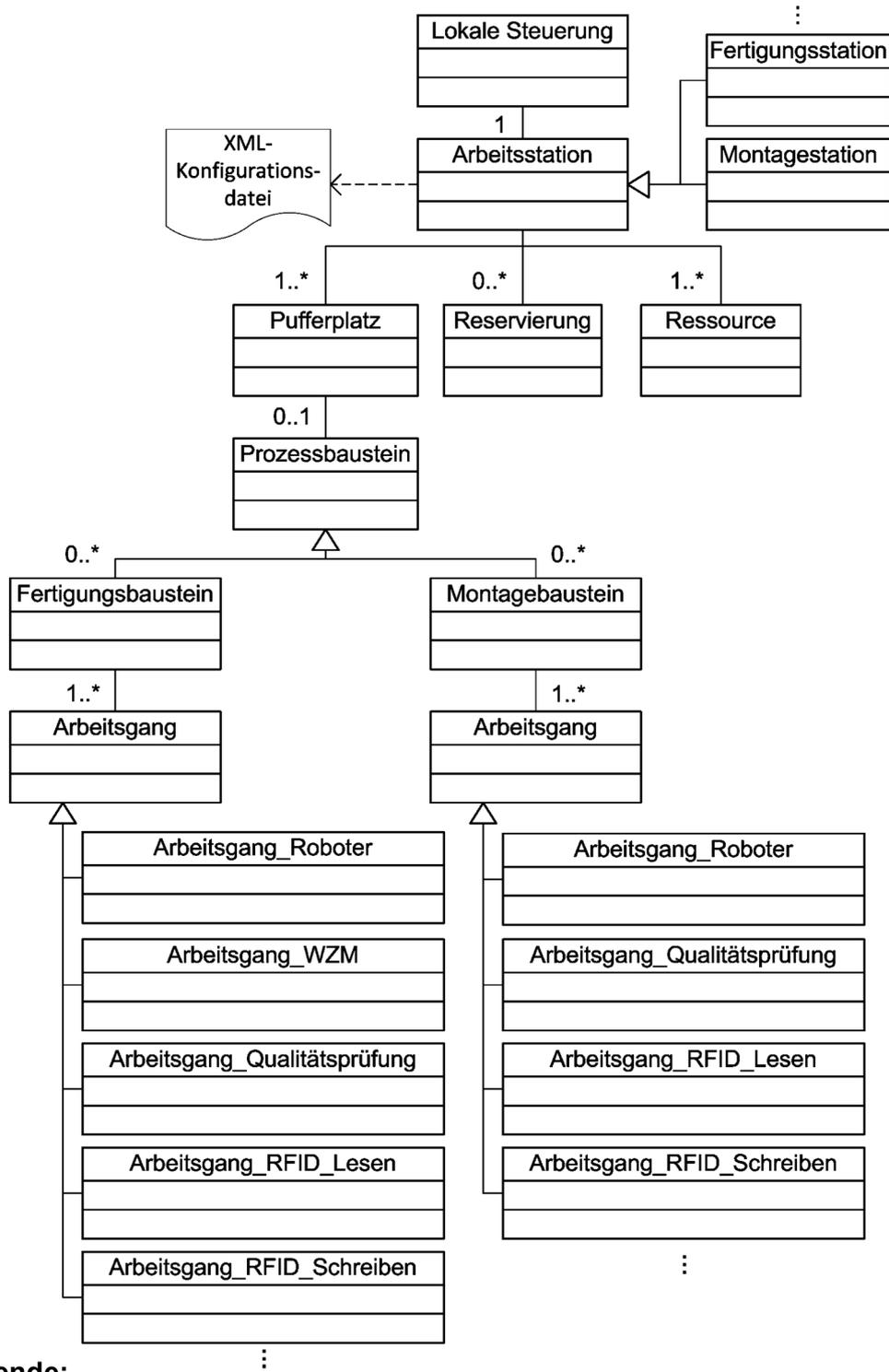
Nach der Berechnung der entsprechenden Abwertungsfaktoren werden den ausgewählten Arbeitsstationen und Ressourcen die Zielvorgaben für die Auftragsdurchführung übergeben. Das Reservierungsobjekt (vgl. Abschnitt 7.4.2 ab Seite 144) wird von der globalen Organisationseinheit in der Klasse *Ablaufplanung* erzeugt und über die Klasse *Lokale Steuerung* der Reservierungsliste, in der die indirekten Bestände einer Station verwaltet werden, hinzugefügt. Das Wissen über den indirekten Bestand wird durch Instanzen in der Klasse *Reservierung* abgebildet. Diese sind der entsprechenden Klasse *Arbeitsstation* zugeordnet. Bei der Auslagerung wird die ressourcenneutrale Beschreibung der produktindividuellen Prozesskette durch die Planungsergebnisse der globalen Organisationseinheit ergänzt. Die zugehörigen Daten werden auf dem intelligenten Produkt hinterlegt. Nach der Auftragsfreigabe durch die Klasse *PrüfungUndAuftragsfreigabe* endet die Zuständigkeit der globalen Organisationseinheit für den betrachteten Auftrag.

In der prototypischen Softwareumsetzung werden die Aufträge nach der erfolgreichen Freigabe in der Visualisierung von der globalen in die lokale Auftrags-ebene verschoben. Ergänzend hierzu wird der aktuelle Zustand in der Werkstatt-ebene mit den zugehörigen Verfügbarkeiten und den Ressourcenauslastungen auf der rechten Seite der Benutzeroberfläche abgebildet (vgl. Abbildung 74).

### Umsetzung der lokalen Organisationseinheiten

Die Struktur und der Aufbau einer Arbeitsstation mit den zugehörigen Ressourcen wurden bereits in Kapitel 5 ausführlich beschrieben. Ergänzend hierzu sind in Abbildung 75 die weiteren Klassen veranschaulicht, die für die Feinplanung und für die Durchführung von Fertigungs- und Montagevorgängen sowie von Qualitätsprüfungen verwendet werden. Der Aufbau des wissensbasierten Systems wird in Abschnitt 8.2.2.4 beschrieben.

Nach der Ankunft eines neuen Bauteils auf einem Pufferplatz wird durch den entsprechenden induktiven Sensor eine Zustandsänderung in der Klasse der *Fertigungsstation* bzw. der *Montagestation* identifiziert. In der zugehörigen *Pufferplatz*-Klasseninstanz wird der Lagerplatz daraufhin als belegt gekennzeichnet und ein Arbeitsgang zum Auslesen der produktspezifischen Daten (Klasse *Arbeitsgang\_RFID\_Lesen*) generiert. Nach dem Lesevorgang werden der *Pufferplatz*-Klasseninstanz die entsprechende RFID-Transponder-Nummer sowie die produktindividuelle Prozesskette hinzugefügt. Im Anschluss daran werden die produkt- und prozessspezifischen Daten im Petri-Netz über eine entsprechende Methode in der Klasse *Fertigungsstation* bzw. *Montagestation* interpretiert. Der freigeschaltete verfahrens- und ablaufspezifische Baustein wird in Form einer entsprechenden *Prozessbaustein*-Klasseninstanz (Fertigungs- oder Montagebaustein) als direkter Bestand der betrachteten lokalen Organisationseinheit zugeordnet. Da die aktuellen produkt- und prozessspezifischen Daten die Grundlage für die lokale Planung darstellen, wird das zugehörige Reservierungsobjekt, das von der globalen Organisationseinheit generiert wurde, gelöscht.



**Legende:**

- Assoziation      —▷ Generalisierung      - - - - -> Abhängigkeit
- 0..\* Multiplizität      

Klasse

 Klasse

Abbildung 75: Statisches Klassendiagramm einer lokalen Organisationseinheit in UML-Schreibweise

Der verfahrens- und ablaufspezifische Baustein in der produktindividuellen Prozesskette kennzeichnet ausschließlich einen Arbeitsvorgang und berücksichtigt keine Nebentätigkeiten, wie beispielsweise Handhabungsvorgänge oder RFID-Lese- und Schreibprozesse. Um einen Arbeitsablauf unter Berücksichtigung von nicht wertschöpfenden Nebentätigkeiten vollständig beschreiben zu können, wird lokales Wissen in die Feinplanung integriert. In diesem Zusammenhang setzt sich ein Fertigungs- oder Montagebaustein aus einer beliebigen Anzahl an sequenziellen Arbeitsgängen zusammen, die für die vollständige Durchführung eines Arbeitsvorganges notwendig sind. Die einzelnen Arbeitsgänge umfassen sowohl wertschöpfende Tätigkeiten (z. B. Montagevorgang) als auch nicht wertschöpfende Nebentätigkeiten (z. B. Beschickung der Werkzeugmaschine). Ein Beschickungsvorgang wird z. B. über die Klasseninstanz *Arbeitsgang\_Roboter* beschrieben und kann während seiner Ausführung nicht unterbrochen werden. Bei der Instanziierung eines Fertigungs- oder Montagevorganges werden die notwendigen zusätzlichen Arbeitsgänge (z. B. Beschickungs- und Entladevorgang) automatisch abgeleitet und in den zugehörigen Fertigungs- oder Montagebaustein integriert. Die jeweilige Klasseninstanz des Fertigungsbausteins oder des Montagebausteins verwaltet die einzelnen Arbeitsgänge. Nach dem Abschluss eines Arbeitsganges (z. B. Beschickung der Werkzeugmaschine) wird der nachfolgende Arbeitsgang (z. B. Bearbeitung auf der Werkzeugmaschine) freigegeben.

Die generierten Fertigungs- bzw. Montagebausteine mit den zugehörigen Arbeitsgängen bilden somit eine wesentliche Grundlage für die Feinplanung durch die jeweilige lokale Organisationseinheit. Wie in Kapitel 7 erläutert, wird die lokale Planung mit Hilfe von Planungsfunktionen beschrieben. In Abhängigkeit der Stationsausprägung (z. B. Fertigungs- oder Montagestation) können unterschiedliche Verfahren zur Reihenfolgeplanung bzw. Ablaufoptimierung angewendet werden. Die Planungsbibliotheken der lokalen Organisationseinheiten sind aus diesem Grund in der Klasse *Fertigungsstation* bzw. *Montagestation* hinterlegt.

Für die Berechnung von Prioritäten und Bearbeitungsfristen werden den Planungsfunktionen spezifische Kennzahlen (z. B. Schlupfzeit) aus den Fertigungs- und Montagebausteinen bereitgestellt. Diese berechnen sich zum einen aus den Daten der produktindividuellen Prozesskette (z. B. Liefertermin, Plan-Durchführungszeit). Zum anderen kann die Ermittlung der Kennzahlen durch stationsspezifisches Erfahrungswissen (z. B. Zeitdauer für die Beschickung und für die Entladung von Ressourcen), welches in lokalen Datenbanken hinterlegt ist, ergänzt werden. Basierend auf den produktspezifischen Plandaten, dem stationsspezifischen Erfahrungswissen und den Planungsfunktionen in den zugehöri-

gen Planungsbibliotheken werden die freigegebenen Arbeitsgänge auf die zugehörigen Ressourcen verteilt.

Neben dem direkten Bestand, der den jeweiligen Instanzen der Klasse *Pufferplatz* zugeordnet ist, kann der indirekte Bestand optional bei der lokalen Feinplanung berücksichtigt werden. In diesem Fall werden die Reservierungsobjekte, die von der globalen Organisationseinheit übergeben wurden, bei der Priorisierung von Arbeitsgängen mit einbezogen.

Durch die Analyse der Plan- und der Ist-Zeiten bei der Auftragsdurchführung (z. B. Wartezeit, Bearbeitungszeit) können Abweichungen gegenüber den Planungsannahmen frühzeitig identifiziert werden. Bei der Überschreitung eines festgelegten Schwellenwertes werden die Organisationseinheiten in der Werkstattebene über den beschleunigten oder verzögerten Durchlauf eines Auftrages informiert. Unter Angabe der Auftrags-Identifikationsnummer (Auftrags-ID) und der entsprechenden Zeitänderung werden alle Arbeitsstationen über eine entsprechende Methode in der Klasse *Lokale Steuerung* benachrichtigt. Dieser sogenannte Broadcast-Mechanismus initiiert eine Prüfung der hinterlegten Reservierungen und resultiert im Fall der Übereinstimmung in einer Anpassung der Reservierungsobjekte (vgl. Abbildung 67 auf Seite 158).

Nach dem erfolgreichen Abschluss eines Arbeitsvorganges werden die Daten in der produktindividuellen Prozesskette angepasst (dokumentationsbezogener Baustein) und der nachfolgende verfahrens- und ablaufspezifische Baustein wird freigeschaltet. Das aktualisierte Petri-Netz wird anschließend wieder auf dem RFID-Transponder des intelligenten Produktes hinterlegt.

In Abbildung 76 ist die Benutzeroberfläche einer lokalen Organisationseinheit am Beispiel einer Fertigungsstation dargestellt. Neben dem indirekten Bestand mit einer Übersicht der einzelnen Reservierungsobjekte werden auch die direkten Bestände mit den zugehörigen produkt- und prozessspezifischen Daten angezeigt. In der Planungsbibliothek sind unterschiedliche Planungsfunktionen hinterlegt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die Schlupfzeitregel und die FIFO-Regel (First-in-First-out-Regel) implementiert.

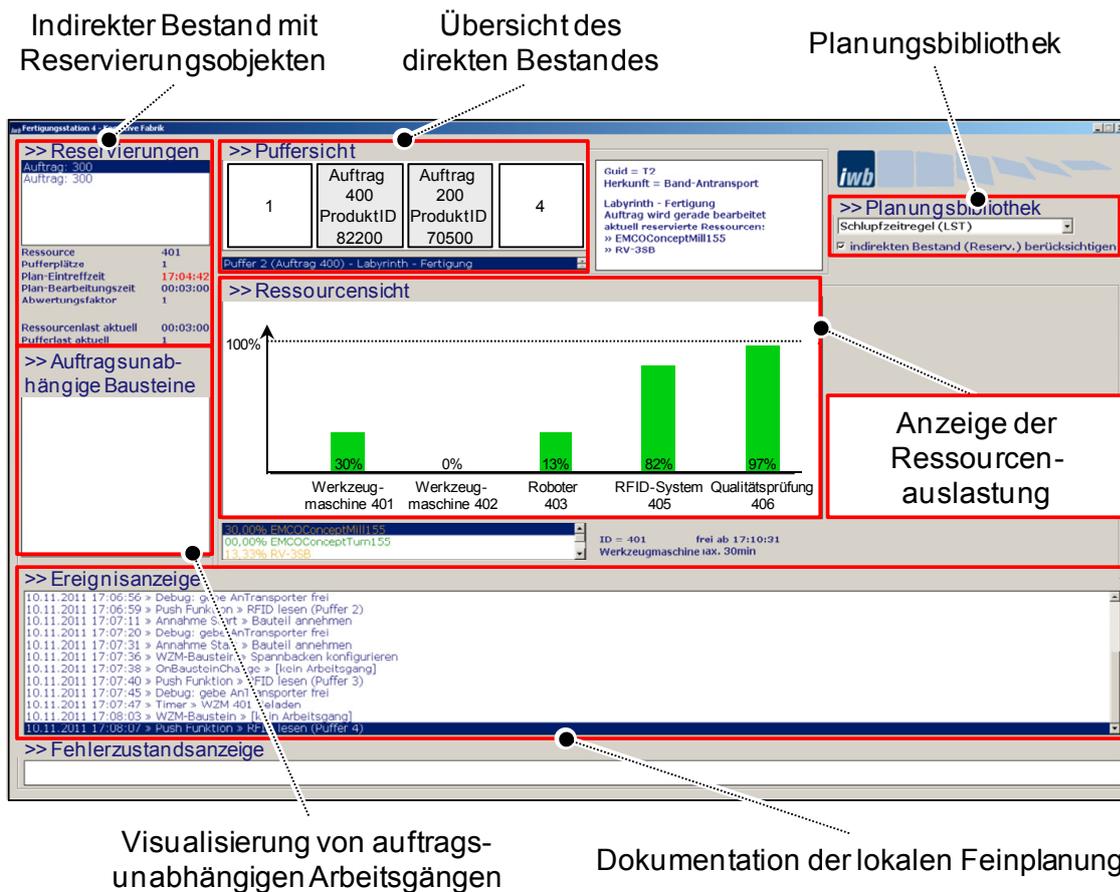


Abbildung 76: Benutzeroberfläche einer lokalen Fertigungsstation

### 8.2.2.4 Wissensbasiertes System zum autonomen Störungsmanagement

Eine spezifische Ausprägung der verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine ist der Qualitätsbaustein. Dieser initiiert die Qualitätsprüfung und beschreibt den Prüfumfang mit den zugehörigen Anweisungen.

#### Softwaretechnische Konzeption

Die Architektur des wissensbasierten Systems zum autonomen Störungsmanagement ist in Abbildung 77 zu sehen. Basierend auf der allgemeinen Architektur eines Expertensystems (vgl. Abschnitt 4.3.2 ab Seite 63) besteht das System aus einer Wissensbasis sowie einem Steuersystem mit einer Inferenz-, einer Erklärungs- und einer Wissenserwerbskomponente. Zur Sicherstellung der Kompatibilität mit der produktindividuellen Prozesskette und der Organisationsstruktur wurde das wissensbasierte System um einen Syntaxanalysator für Qualitäts- und Aktionsdaten sowie einer Arbeitsplan-Änderungs-Komponente ergänzt. Die Aufgabe des Syntaxanalysators für Qualitätsdaten ist es, die aufgenommenen

Soll- und Ist-Daten des Werkstückes in das Faktenformat des wissensbasierten Systems umzuwandeln (OSTGATHE et al. 2011).

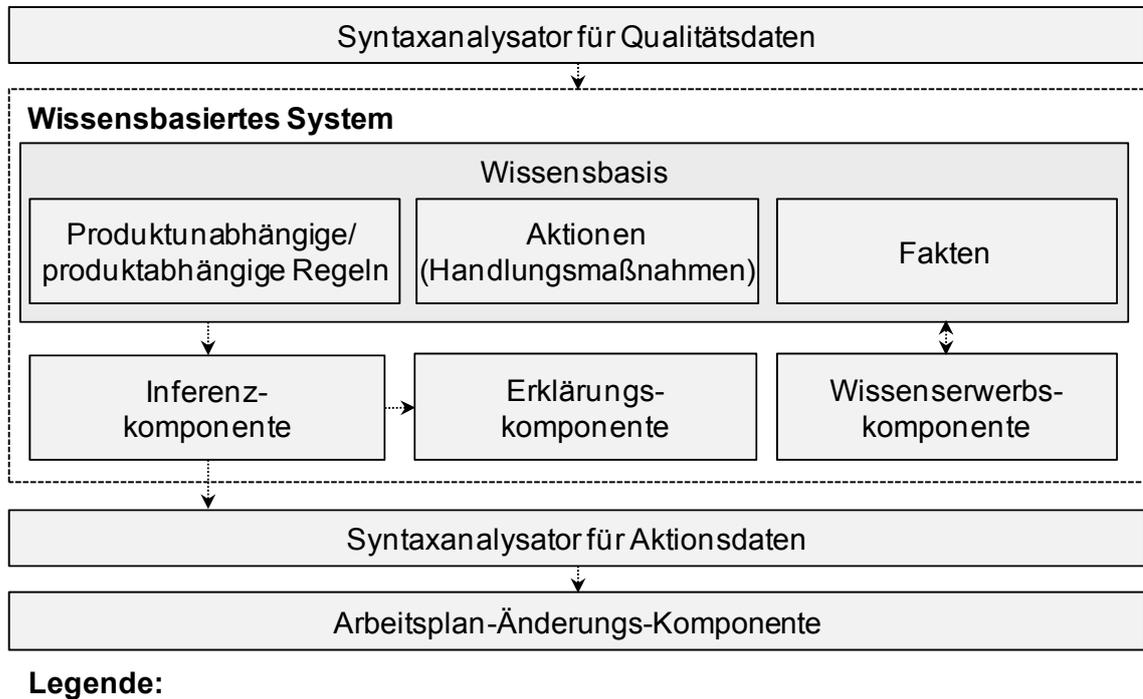


Abbildung 77: Architektur des wissensbasierten Systems zum autonomen Störungsmanagement (in Anlehnung an OSTGATHE et al. 2011)

Wie in Kapitel 4 dargelegt, ist die funktionale Trennung zwischen der Wissensbasis und der Wissensverarbeitungs- bzw. Inferenzkomponente das wichtigste Merkmal von wissensbasierten Systemen. In Anlehnung an das Datenmodell für adaptive Produktionssysteme (vgl. Kapitel 5) wird die Wissensbasis für eine kontext- und anwendungsunabhängige Verwendbarkeit in einer XML-basierten Auszeichnungssprache für Regeln modelliert (OSTGATHE et al. 2011). Die Rule Markup Language (RuleML), die von der RuleML-Initiative definiert wurde, bietet die Möglichkeit zur XML-basierten Repräsentation von Regeln und der zugehörigen Fakten (BOLEY 2001). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind in der Wissensbasis produktunabhängige und produktabhängige Regeln hinterlegt. Da die produktunabhängigen Regeln allgemeingültig sind, werden diese gesammelt in einer RuleML-Datei abgelegt. Ergänzend hierzu sind die produktabhängigen Regeln für jeden Produkttyp (z. B. Gehäusehälfte 1 in Abbildung 72 auf Seite 168) in einer individuellen RuleML-Regeldatei gespeichert. Die Verarbeitung der vorliegenden Regeln und Fakten in der Wissensbasis erfolgt mit Hilfe der datengetriebenen Inferenz. In diesem Zusammenhang wurde die frei verfügbare Regelmaschine NxBRE (.Net Business Rule Engine) in das wissensbasierte

System zum autonomen Störungsmanagement integriert. Der Abschluss der Regelanwendung ist durch die Ableitung von Handlungsmaßnahmen gekennzeichnet. Die produktspezifischen Aktionen sind als vorkonfigurierte Prozessbausteine in der Wissensbasis abgelegt. Eine Übersicht der angewendeten Regeln und der erzielten (Zwischen-)Ergebnisse werden dem Benutzer in der Erklärungskomponente veranschaulicht (OSTGATHE et al. 2011).

Der Syntaxanalysator für Aktionsdaten liest die abgeleiteten Handlungsmaßnahmen aus der produktspezifischen Aktionsdatei aus und übergibt diese an die Arbeitsplan-Änderungs-Komponente. Diese integriert die zusätzlichen verfahrens- und ablaufspezifischen Bausteine in die produktindividuelle Prozesskette (OSTGATHE et al. 2011).

### Beispielhafte Anwendung

Die sensortechnische Erfassung von relevanten Merkmalsausprägungen ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Aus diesem Grund wurde die Datenaufnahme über eine Simulationsmaske durchgeführt (vgl. Abbildung 78).

Produktmerkmal	Einheit	Ist-Wert	Soll-Wert
Werkstoff			PA66
Werkstoffhärte	[N/mm <sup>2</sup> ]		160
Oberflächenrauheit	[µm]	10.5	10.5
Feature_1_Höhe	[mm]	13.2	13.1;13.5
Feature_1_Durchmesser	[mm]	6.21	6.14;6.34
Feature_2_Höhe	[mm]	13.2	13.1;13.5
Feature_2_Durchmesser	[mm]	6.09	6.14;6.34
Feature_3_Höhe	[mm]	13.25	13.1;13.5
Feature_3_Durchmesser	[mm]	6.22	6.14;6.34
Feature_4_Höhe	[mm]	13.15	13.1;13.5
Feature_4_Durchmesser	[mm]	6.21	6.14;6.34
Länge	[mm]	80.15	80.0;80.2
Breite	[mm]	59.9	59.9;60.1
Höhe	[mm]	15.3	15.04;15.24
Ebenheitstoleranz	[mm]	0.04	0.04

Abbildung 78: Simulationsmaske zur Erfassung von Produktmerkmalen (in Anlehnung an OSTGATHE et al. 2011)

Als Grundlage für die Auswertung der Erzeugnisqualität werden die eingegebenen Ist-Werte anschließend den zugehörigen Soll-Werten, die im dokumentati-

onsbezogenen Baustein hinterlegt sind, gegenübergestellt. Für die nachfolgende Bearbeitung im wissensbasierten System werden die erfassten Werte durch den Syntaxanalysator in das Faktenformat der RuleML-Spezifikation konvertiert (Abbildung 79).

1	[...]				
2	<fact>				
3	<_rlab>	Ist-Wert	Ist-Daten-Erfassung durch eine Messung bzw. eine Simulationsmaske		
4	<ind>Höhe</ind>				
5	</_rlab>				
6	<_head>				
7	<atom>				
8	<_opr>				
9	<rel>HöheValue</rel>				
10	</_opr>				
11	<ind>Höhe</ind>				
12	<ind>expr:15.3</ind>				
13	</atom>				
14	</_head>				
15	</fact>				
16	<fact>				
17	<_head>	Unteres Grenzabmaß	 Soll-Daten aus dem dokumentationsbezogenen Baustein		
18	<atom>				
19	<_opr>				
20	<rel>Minimum</rel>				
21	</_opr>				
22	<ind>Höhe</ind>				
23	<ind>expr:15.04</ind>				
24	</atom>				
25	</_head>				
26	</fact>				
27	<fact>				
28	<_head>	Oberes Grenzabmaß	 Soll-Daten aus dem dokumentationsbezogenen Baustein		
29	<atom>				
30	<_opr>				
31	<rel>Maximum</rel>				
32	</_opr>				
33	<ind>Höhe</ind>				
34	<ind>expr:15.24</ind>				
35	</atom>				
36	</_head>				
37	</fact>				
38	[...]				

Abbildung 79: Beispielhafte Abbildung der Ist- und der Soll-Daten (Fakten) in der temporären Wissensdatei

Diese Eingangsdaten repräsentieren das initiale Faktenwissen. Zusammen mit den produktunabhängigen und den produktabhängigen Regeln werden die Fakten in einer temporären Wissensdatei integriert. In der nachfolgenden Regelnanwendung (Inferenz) werden die vorliegenden Fakten (z. B. Ist-Höhe, Toleranzbereich der Bauteilhöhe) gegen die Vorbedingungen (Prämissen) der zur Verfügung stehenden Regeln geprüft. Bei einer unzureichenden Produktqualität werden durch

die Schlussfolgerungen (Konklusionen) allgemeine Fehlerklassifikationen (z. B. Maßfehler) abgeleitet. Diese bilden wiederum die Grundlage für die Ableitung von weiteren Konklusionen. Die produktunabhängigen und die produktabhängigen Regeln werden so lange angewendet, bis keine anwendbaren Regeln mehr vorliegen. Mit Hilfe der erkannten Merkmalsabweichungen (z. B. Maßfehler) und der zugehörigen Fehlerklassifikationen (z. B. Beschaffenheitsfehler) werden abschließend produktspezifische Handlungsmaßnahmen (z. B. Nacharbeit, Ausschuss) abgeleitet. Im Fall einer Nacharbeit sind die Aktionen in Form von Nacharbeitsbausteinen in der Wissensbasis hinterlegt. Das Ergebnis der beschriebenen Regelnanwendungen ist in Abbildung 80 beispielhaft verdeutlicht.

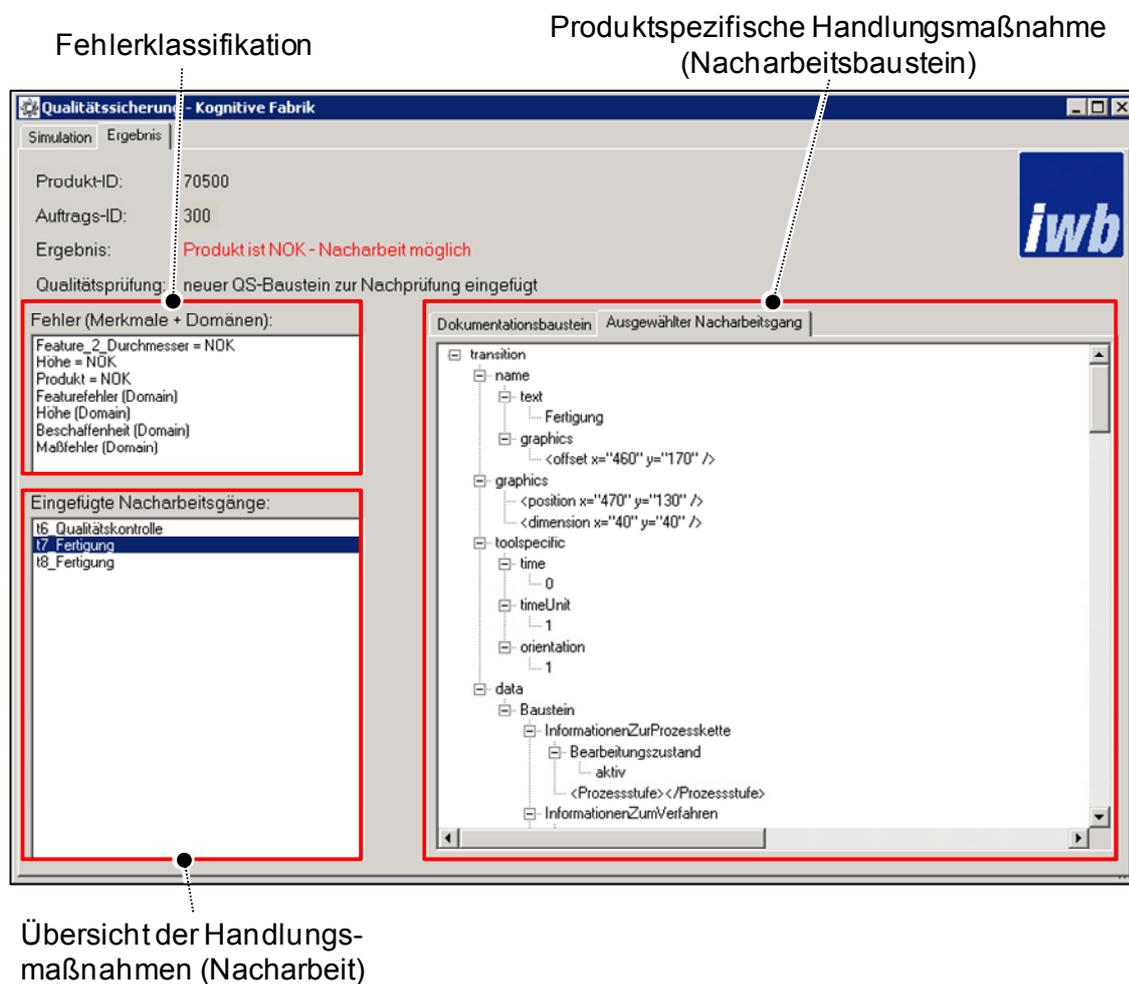


Abbildung 80: Ergebnis der Qualitätsprüfung mit einem ausgewählten Nacharbeitsgang (in Anlehnung an OSTGATHE et al. 2011)

Das Hinzufügen von neuen Regeln bzw. Aktionen sowie die Bearbeitung und das Entfernen von bestehenden Regeln bzw. Aktionen in der Wissensbasis werden mit Hilfe der Wissenserwerbskomponente durchgeführt. Am Beispiel der produktunabhängigen Regel für die Beurteilung der Höhe ist in Abbildung 81 die

Benutzeroberfläche des Regeleditors abgebildet. Die Regel *Höhe NOK* (Feld: Regelname) definiert zwei Fälle, in denen die Bauteilhöhe nicht den Anforderungen entspricht. Die Grundlage für die Definition der Regeln bilden die Regelvariablen, welche die zu untersuchenden Merkmalsvariablen mit den zugehörigen Soll- (Minimum, Maximum) und Ist-Werten (HöheValue) enthalten. Neben der Festlegung von neuen Regelvariablen können alternativ mögliche Rückgabewerte (Ergebnisse) von bereits bestehenden Regeln zur Definition einer neuen Regel genutzt werden. In Abhängigkeit der definierten Regelvariablen werden die Vorbedingungen (Prämissen) einer Regel definiert.

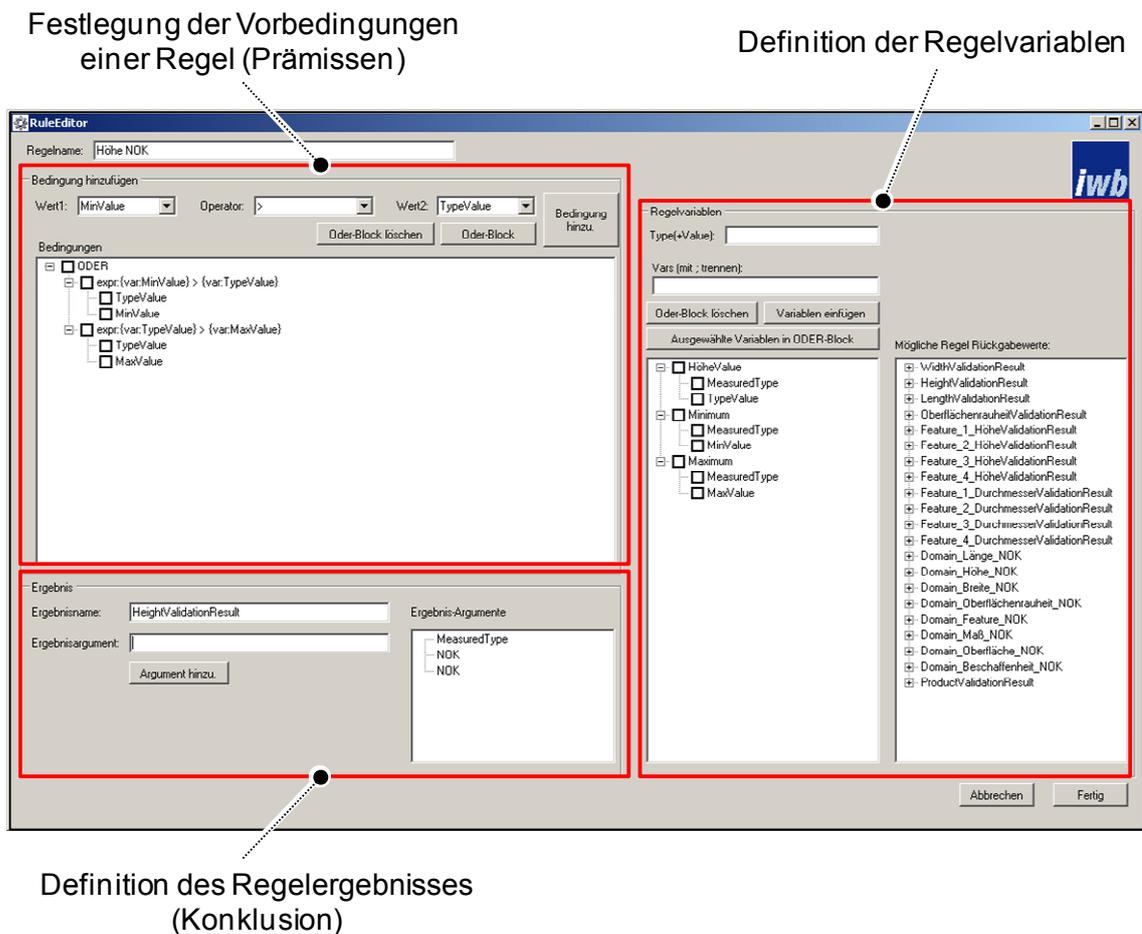


Abbildung 81: Editor für die Bearbeitung, Ergänzung oder Entfernung von Regeln in der Wissensbasis

Die Konklusion einer Regel wird im Ergebnisteil des Regeleditors definiert. Der Ergebnisname kann in weiteren Regeln als neue Variable genutzt werden. Bei einer unzureichenden Bauteilhöhe kann aus dem Ergebnis (Konklusion) beispielsweise auf einen geometriebezogenen Fehler oder einen Beschaffenheitsfehler geschlossen werden.

## 8.3 Simulationstechnische Validierung

### 8.3.1 Allgemeines

In Ergänzung zu der hardwaretechnischen Umsetzung wurden der Nutzen und die Leistungsfähigkeit des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen in einem Simulationsmodell validiert. Eine Simulation ist nach VDI-RICHTLINIE 3633 (2010, S. 3) 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 Untersuchungen wurden mit Hilfe des objektorientierten Simulationswerkzeuges *Plant Simulation*<sup>®</sup> durchgeführt. Um einen Bezug zur realen Modellfabrik in Abschnitt 8.2 herzustellen, wurde das Simulationsmodell mit zusätzlichen Arbeitsstationen versehen (vgl. Abbildung 82). Dies soll zum einen die Abbildung einer umfangreichen Prozesskette und zum anderen die simulative Bereitstellung von redundanten Ressourcen ermöglichen. Das Modell besteht aus insgesamt neun Stationen mit jeweils drei Dreh- und drei Fräsbearbeitungszentren, zwei Arbeitsstationen zur Qualitätsprüfung und einer Station zur Feinbearbeitung. Die einzelnen Arbeitsstationen haben eine definierte Anzahl an Pufferplätzen und sind durch ein automatisiertes Transportsystem miteinander verbunden.

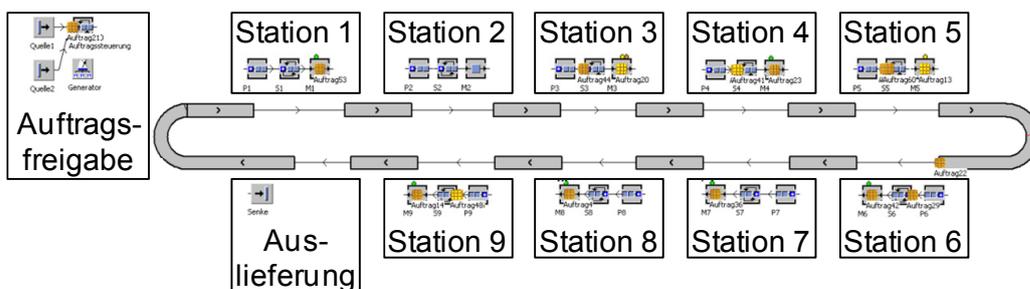


Abbildung 82: Aufbau des Simulationsmodells zur Validierung des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen

Als Beispielprodukt wurden Getriebe, die in einer hohen Anzahl an Varianten hergestellt werden, ausgewählt. Der Produktionsplan, welcher die gewünschten Getriebe und die zugehörigen Lieferzeitpunkte spezifiziert, wurde für die verschiedenen Simulationsexperimente per Zufallsgenerator definiert. Auf Basis eines Produktionsplanes wurden die notwendigen Komponenten des ausgewählten Getriebes automatisch festgelegt. Da sich das entwickelte System insbesondere auf die auftragsbezogene Produktion fokussiert, wurden die einzelnen Er-

zeugnisvarianten immer in der Stückzahl 1 simulativ hergestellt. Um die charakteristischen Eigenschaften einer Werkstattfertigung mit einem heterogenen Fluss an Aufträgen und einer hohen Durchlaufzeitstreuung abbilden zu können, wurde den einzelnen Produktvarianten eine unterschiedliche Anzahl an Arbeitsvorgängen mit verschiedenen, erzeugnisspezifischen Maschinenfolgen und Bearbeitungszeiten zugewiesen.

### 8.3.2 Simulationsmodelle und Versuchsplanung

Die systematische Variation von ausgewählten Modellparametern soll quantitative Aussagen über die Leistungsfähigkeit des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen ermöglichen. Ergänzend zu diesem Referenzmodell wurden in einem zweiten Simulationsmodell (Vergleichsmodell), welches auf dem Modell aus Abbildung 82 basiert, Untersuchungen mit einem konventionellen Ansatz zur Steuerung von Produktionsabläufen durchgeführt. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, wurden die Experimente in diesen beiden unterschiedlichen Simulationsmodellen jeweils mit einem identischen Produktionsplan vorgenommen.

Bezug nehmend auf die Bedeutung der in Kapitel 2 vorgestellten logistischen Zielgrößen wurden diese als Grundlage für die Bewertung gewählt. In diesem Zusammenhang wurden insbesondere die nachstehenden charakteristischen Kennzahlen betrachtet:

- Anzahl der fertiggestellten Aufträge
- Termineinhaltung
- Flussgrad

Bei den Simulationsexperimenten wurden die Auswirkungen der nachfolgenden Rahmenbedingungen auf die zugrundeliegenden charakteristischen Kennzahlen in beiden Modellen untersucht:

- Idealisierter Ablauf ohne Störeinflüsse (Nacharbeitsquote von 0 %)
- Berücksichtigung von produktbezogenen Störungen mit Nacharbeitsquoten von 10 %, 20 %, 30 % und 40 %

Je Nacharbeitsquote wurden jeweils sieben Simulationsexperimente mit unterschiedlichen Produktionsplänen (vgl. Abschnitt 8.3.1) durchgeführt.

Im idealisierten Ablauf wurden weder produkt- noch ressourcenbezogene Störungen im Fertigungsablauf betrachtet. Im Referenzmodell erfolgte vor der jeweiligen Auftragsfreigabe ein Abgleich der auftragspezifischen Anforderungen

mit den ressourcenspezifischen Fähigkeiten. Neben der technischen Durchführbarkeit war in diesem Zusammenhang insbesondere die aktuelle Kapazitätsauslastung ein Entscheidungskriterium für die Ressourcenzuweisung. Gemäß den Ausführungen in Kapitel 7 wurde im Referenzmodell zusätzlich eine lokale Optimierung an den einzelnen Arbeitsstationen vorgenommen. In den zugehörigen Planungsbibliotheken des Simulationsmodells wurden beispielhaft die Schlupfzeitregel und eine Planungsfunktion zur Optimierung der Rüstaufwände hinterlegt.

Im Vergleichsmodell wurde ein linearer Arbeitsplan mit einer fest vorgegebenen Ressourcenverteilung als Grundlage für die Auftragsdurchführung verwendet. Bei der Auftragsfreigabe wurde beispielhaft das grundlegende Kriterium der Arbeitsstationsbelastung betrachtet. In Anlehnung an das Verfahrensprinzip der belastungsorientierten Auftragsfreigabe (BOA) wurden die Aufträge bis zum Erreichen der definierten Bestandsgrenze an den betreffenden Arbeitsstationen freigegeben. Im Rahmen der Auftragsdurchführung hat an den einzelnen Arbeitsstationen eine sequenzielle Bearbeitung nach der FIFO-Regel stattgefunden.

Um den Einfluss von produktbezogenen Störungen auf das Systemverhalten zu untersuchen, wurde im Rahmen der Simulationsexperimente jedes Bauteil einer 100 %-Qualitätsprüfung unterzogen. Im Simulationsmodell wurde auf Basis einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeitsverteilung über die Qualität des untersuchten Produktes und über das weitere Vorgehen entschieden. Die zugehörige Nacharbeitsquote war Eingangsparemeter für die Simulation, die in den unterschiedlichen Experimenten schrittweise von 0 % (idealisierte Ablauf) auf maximal 40 % erhöht wurde. Bei Vorliegen eines Gutteils wurde der geplante Produktionsablauf fortgesetzt. Im Fall einer unzureichenden Produktqualität wurde der produktspezifische Arbeitsplan durch die Integration von zusätzlichen Arbeitsvorgängen, die mit Hilfe einer Wahrscheinlichkeitsverteilung aus einer vorgegebenen Liste ausgewählt wurden, angepasst. Da die Nacharbeitsschritte im entwickelten System mit Hilfe eines wissensbasierten Systems abgeleitet werden, wurden die zusätzlichen Arbeitsvorgänge im Referenzmodell ohne eine zeitliche Verzögerung in den nachfolgenden Fertigungsablauf integriert. In Anlehnung an die in Kapitel 7 beschriebene Vorgehensweise wurden weitere benötigte Kapazitäten reserviert und der Abwertungsfaktor bei den betroffenen Ressourcen angepasst. Im Vergleichsmodell mit einer konventionellen Auftragssteuerung wurde simulativ eine manuelle Auswahl von Nacharbeitsschritten vorgenommen. Diese wurde mit einem zeitlichen Aufwand von zwei Stunden kalkuliert. Die charakteristischen Merkmale und Eingangsparemeter der beiden Simulationsmodelle sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

	<b>Referenzmodell (System zur produkt- basierten Steuerung)</b>	<b>Vergleichsmodell (konventionelle Auftrags- steuerung)</b>
<b>Simulationszeit</b>	24 Stunden	24 Stunden
<b>Losgröße Auftrag</b>	1	1
<b>Arbeitsplan</b>	Verzweigter Arbeitsplan	Linearer Arbeitsplan
<b>Ressourcenzuweisung</b>	Flexibel durch Anforderungen-Fähigkeiten- Abgleich	Feste Ressourcenzuweisung im Arbeitsplan
<b>Lokale Reihenfolge- bildung</b>	Schlupfzeitregel und Opti- mierung der Rüstzeiten	First-in-First-out
<b>Störungsmanagement</b>	Wissensbasiertes System mit automatisierter Ableitung von Nacharbeitsschritten	Manuelle Ableitung von Nacharbeitsschritten (2 Stunden, kalkulatorischer Aufwand)
<b>Nacharbeitsquoten</b>	0%, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %	0%, 10 %, 20 %, 30 %, 40 %
<b>Simulations- experimente je Nacharbeitsquote</b>	7	7

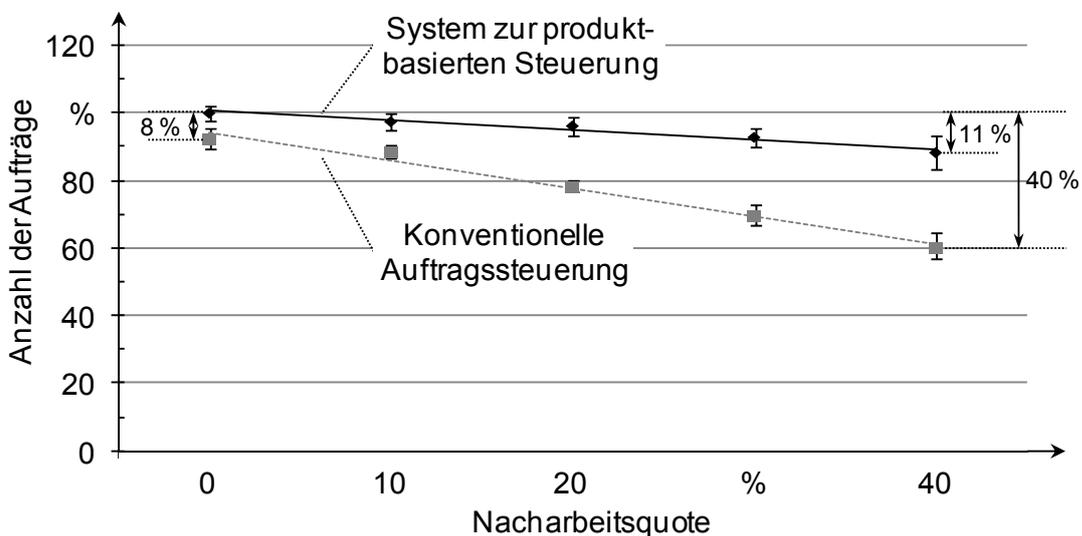
*Tabelle 4: Zusammenfassung der charakteristischen Merkmale und Eingangsparameter der untersuchten Simulationsmodelle*

### 8.3.3 Analyse und Diskussion der Simulationsergebnisse

Zur Bewertung der Leistungsfähigkeit des Systems zur produktbasierten Steuerung wurden die Veränderungen der in Abschnitt 8.3.2 vorgestellten charakteristischen Kennzahlen im Vergleich zum idealisierten Ablauf betrachtet. Hierzu wurden die arithmetischen Mittelwerte und die zugehörigen Standardabweichungen der Simulationsergebnisse für die unterschiedlichen Rahmenbedingungen berechnet. Darauf aufbauend sind diese Werte jeweils auf die durchschnittlichen Ausgangswerte des Referenzmodells normiert worden. Ergänzend hierzu wurden alle Simulationsergebnisse des Vergleichsmodells in Beziehung zu den Ausgangswerten des idealisierten Ablaufs des Referenzmodells gesetzt. Die Ergebnisse der Simulationsexperimente mit dem Referenz- und dem Vergleichsmodell sind in den nachfolgenden Abbildungen zu sehen. Sie zeigen die Veränderungen

der charakteristischen Kennzahlen in Abhängigkeit der Nacharbeitsquote. Der Verlauf der betrachteten charakteristischen Kennzahlen wird durch die resultierenden Trendlinien visualisiert.

Die Veränderung der Zahl der fertiggestellten Aufträge im Betrachtungszeitraum in Abhängigkeit der produktbezogenen Störeinflüsse ist in Abbildung 83 verdeutlicht. Die Simulationsergebnisse belegen, dass mit Hilfe des Systems zur produktbasierten Steuerung unter idealisierten Rahmenbedingungen ein im Mittel um 8 % höherer Auftragsdurchsatz im Vergleich zur konventionellen Auftragssteuerung erzielt werden konnte. Mit einem zunehmenden Grad an produktbezogenen Störungen ging der Auftragsdurchsatz im Referenzmodell zurück und erreichte bei einer Nacharbeitsquote von 40 % einen um 11 % geringeren Wert im Vergleich zur Ausgangssituation.



**Legende:**

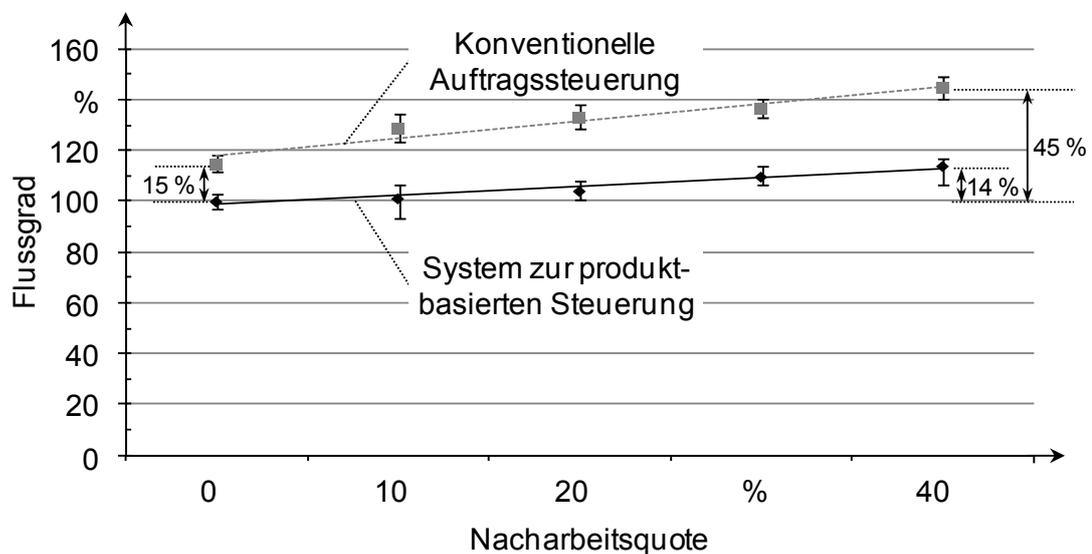
- ◆ : System zur produktbasierten Steuerung
- : Trendlinie (System zur produktbasierten Steuerung)
- : Konventionelle Auftragssteuerung
- : Trendlinie (Konventionelle Auftragssteuerung)
- I : Standardabweichung

Abbildung 83: Veränderung der Zahl der fertiggestellten Aufträge in Abhängigkeit der Nacharbeitsquote für das Referenz- und für das Vergleichsmodell

Demgegenüber war beim Vergleichsmodell ein mittlerer Rückgang der Zahl der fertiggestellten Aufträge um 32 % (40 % gegenüber dem idealisierten Ablauf des Referenzmodells) bei einer Nacharbeitsquote von 40 % festzustellen. Die Ergebnisse können dadurch begründet werden, dass durch die auftragsunabhängige und ressourcenneutrale Darstellung des Arbeitsplans mögliche Freiheitsgrade bei der

Maschinenbelegung berücksichtigt werden. Die zusätzlichen Kapazitätsbelastungen durch Nacharbeitsvorgänge können daher vom System zur produktbasierten Steuerung besser verarbeitet werden. Gleichzeitig ermöglicht das autonome Störungsmanagement die Identifizierung von unzureichenden Produktqualitäten und die echtzeitnahe Ableitung von entsprechenden Handlungsmaßnahmen, die zu einer Adaption des Produktionsablaufes führen. Bei einem linearen Arbeitsplan mit einer fest vorgegebenen Ressourcenverteilung ist eine zustandsbezogene Maschinenbelegung nicht möglich.

Durch die Berücksichtigung des Produktzustandes und der zugehörigen organisatorischen Daten (z. B. Liefertermin) wird an den lokalen Organisationseinheiten eine zustandsbezogene Feinplanung durchgeführt. Die regelmäßige Prüfung und dynamische Berechnung der Priorität bei einem Arbeitsvorgang erlaubt die frühzeitige Identifizierung von möglichen Abweichungen gegenüber den Planungsannahmen (z. B. Eintreffzeitpunkt, Durchlaufzeit) der globalen Organisationseinheit und die Berücksichtigung von Störeinflüssen (z. B. Ressourcenausfall, Nacharbeit). Aus diesem Grund lag der Flussgrad im idealisierten Ausgangszustand des Systems zur produktbasierten Steuerung im Mittel um 15 % unter dem Wert des Vergleichsmodells (vgl. Abbildung 84).



#### Legende:

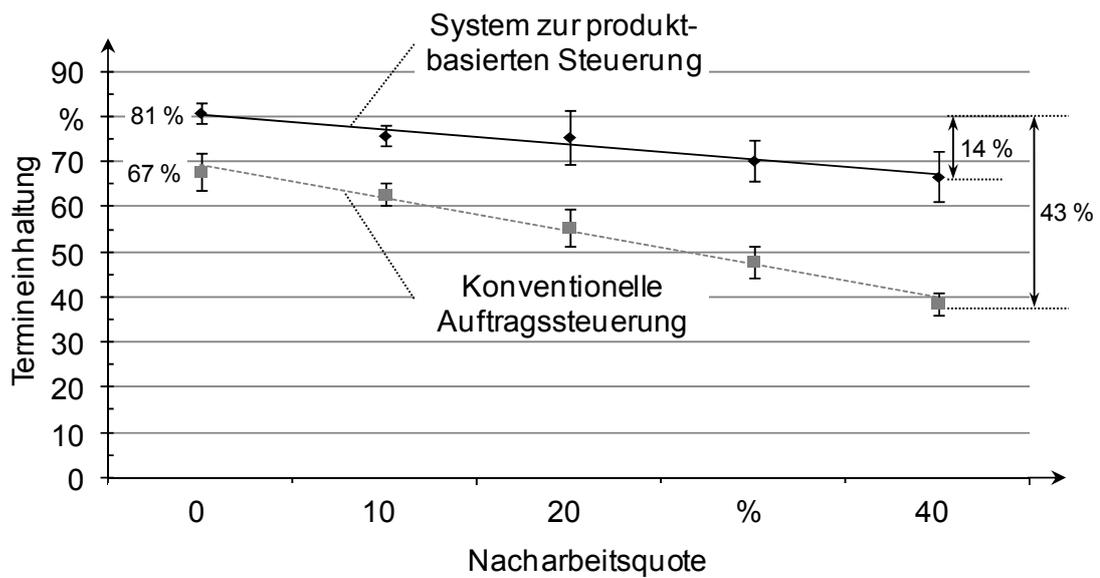
- ◆ : System zur produktbasierten Steuerung
- : Trendlinie (System zur produktbasierten Steuerung)
- : Konventionelle Auftragssteuerung
- ..... : Trendlinie (Konventionelle Auftragssteuerung)
- I : Standardabweichung

Abbildung 84: Veränderung des Flussgrades in Abhängigkeit der Nacharbeitsquote für das Referenz- und für das Vergleichsmodell

Die produktzustandsbezogene Feinplanung an den einzelnen Arbeitsstationen führte auch dazu, dass der Flussgrad im entwickelten System bei einer Nacharbeitsquote von 40 % um 14 % zurückging. Im Vergleich hierzu führten der zeitliche Aufwand für die Identifizierung von Handlungsmaßnahmen und die resultierenden Wartezeiten an den lokalen Arbeitsstationen bei der konventionellen Auftragssteuerung zu einem Rückgang des Flussgrades um 30 % (45 % gegenüber dem idealisierten Ablauf des Referenzmodells) bei einer Nacharbeitsquote von 40 %.

Wie in Kapitel 2 dargelegt, nimmt insbesondere im Bereich der auftragsbezogenen Fertigung und Montage die Bedeutung der logistischen Zielgröße Termintreue bzw. Termineinhaltung zu. Die Auswirkungen der zuvor dargestellten verlängerten Durchlaufzeiten auf die Termineinhaltung sind in Abbildung 85 visualisiert. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden die rechtzeitig ausgelieferten Aufträge ins Verhältnis zu den durchschnittlich fertiggestellten Aufträgen des Referenzmodells ohne Störeinflüsse (0 % Nacharbeit) gesetzt. Beim idealisierten Ablauf zeigte sich, dass beim System zur produktbasierten Steuerung im Durchschnitt 81 % aller Aufträge rechtzeitig fertiggestellt wurden. Im Vergleich hierzu wurden bei der konventionellen Auftragssteuerung im Mittel nur 67 % der vorgegebenen Termine im idealisierten Produktionsablauf eingehalten.

Durch die zustandsbezogene Feinplanung an den lokalen Arbeitsstationen wurden Aufträge mit zusätzlichen Arbeitsvorgängen priorisiert behandelt. Dies hatte zur Folge, dass die Termineinhaltung im entwickelten System bei einer Nacharbeitsquote von 40 % um durchschnittlich 14 % auf 67 % zurückging. Im Gegensatz hierzu führten die Wartezeiten für die Identifizierung von Handlungsmaßnahmen und die sequenzielle Bearbeitung nach der FIFO-Regel im Vergleichsmodell dazu, dass die Termineinhaltung auf etwa 38 % abgesunken ist. Dies bedeutet einen Rückgang um 43 % gegenüber dem idealisierten Produktionsablauf.



#### Legende:

- ◆ : System zur produktbasierten Steuerung
- : Trendlinie (System zur produktbasierten Steuerung)
- : Konventionelle Auftragssteuerung
- ..... : Trendlinie (Konventionelle Auftragssteuerung)
- ⌈ : Standardabweichung

Abbildung 85: Verlauf der Termineinhaltung in Abhängigkeit der Nacharbeitsquote für das Referenz- und für das Vergleichsmodell

## 8.4 Bewertung

### 8.4.1 Allgemeine Bewertung

Das entwickelte System zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen wurde in diesem Kapitel prototypisch umgesetzt und validiert. In diesem Zusammenhang wurde die technische Machbarkeit der produktbasierten Steuerung durch die Integration in eine produktionstechnische Versuchsanlage nachgewiesen. Im Weiteren wurden die Leistungsfähigkeit und der Nutzen des entwickelten Systems durch eine Ablaufsimulation untersucht. Unter Berücksichtigung von produktbezogenen Störeinflüssen wurden die Simulationsergebnisse mit denen einer konventionellen Auftragssteuerung verglichen.

Die prototypische Realisierung und Integration der einzelnen Bestandteile des entwickelten Systems in eine reale Demonstrationsanlage führten zu den folgenden Erkenntnissen:

- Der modulare Stations- und Ressourcenaufbau mit der zugehörigen formalen, XML-basierten Beschreibung von Maschinen und Anlagen ermöglicht die einfache (Re-)Konfiguration eines Produktionssystems. Die statischen und dynamischen Informationen im Ressourcenmodul stellen zudem das notwendige Wissen bereit, um einen formalen, rechnergestützten Abgleich mit den auftragsbezogenen Anforderungen vornehmen zu können.
- Die Modularisierung von Fertigungs- und Montageabläufen mit Hilfe von Prozessbausteinen und die Zusammenfassung der einzelnen Arbeitsvorgänge in einem Petri-Netz erlauben die Abbildung von strukturellen Freiheitsgraden in Produktionsabläufen. Ergänzend hierzu stellt dies die Basis für eine aufwandsarme Adaption des Wertschöpfungsprozesses bei auftretenden produkt- oder ressourcenbezogenen Störungen dar.
- Die dezentrale Speicherung der Daten auf dem intelligenten Produkt („Informationsrucksack“) realisiert die Selbststeuerung des Werkstückes durch die Fertigung und die Montage. Die Kopplung des Informationsflusses an den Materialfluss gewährleistet eine zustandsbezogene Ausführung von Arbeitsvorgängen durch die Referenzierung auf aktuelle Erzeugnisinformationen.
- Das wissensbasierte Störungsmanagement bietet einen ganzheitlichen Ansatz zur regelbasierten Beurteilung ausgewählter Produktmerkmale und zur Ableitung von entsprechenden Handlungsmaßnahmen bei einer unzureichenden Erzeugnisqualität. Die automatisierte Integration von zusätzlichen Arbeitsvorgängen und die resultierende Adaption des produktspezifischen Arbeitsplans ist somit eine wichtige Voraussetzung zur Erreichung einer produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen.
- Die Verteilung von Entscheidungskompetenzen zwischen der globalen Organisationseinheit und den lokalen Organisationseinheiten in der Werkstattebene, unter Berücksichtigung des individuellen Produktes, leistet einen essentiellen Beitrag für eine flexible, zustandsbezogene Planung und Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen.

Mit der simulationstechnischen Validierung wurde nachgewiesen, dass der formale Abgleich der auftragsspezifischen Anforderungen mit den ressourcenspezifischen Fähigkeiten eine zustandsbezogene Auswahl der zur Verfügung stehenden Maschinen und Anlagen sicherstellt. Zusammen mit einer arbeitsstationsbezogenen Optimierung führt die dadurch gewährleistete gleichmäßige Kapazitätsauslastung zu einem höheren Auftragsdurchsatz und zu einer Verbesserung der logistischen Zielgrößen gegenüber der betrachteten konventionellen Auftrags-

steuerung. Der Einsatz eines wissensbasierten Systems zur Behandlung von produktbezogenen Störungen sowie die Berücksichtigung von produkt- und prozessspezifischen Daten bei der lokalen Feinplanung unterstützt darüber hinaus eine fehlerrobuste, adaptive Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen.

#### 8.4.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die monetäre Bewertung des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen hängt von zahlreichen unternehmens- und projektspezifischen Rahmenbedingungen ab. Die Schwierigkeit bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung von Informationssystemen im Allgemeinen und bei der RFID-Technologie im Besonderen besteht nach SCHÜTTE (1998) und VILKOV & WEIß (2008) darin, dass eine Investition nicht dem betriebswirtschaftlichen Standardfall mit einer gegebenen Einzahlungs- und Auszahlungsreihe sowie Zinssätzen entspricht. Dies ist der Grund dafür, dass die Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID in den vergangenen Jahren und aktuell ein Schwerpunkt in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten war bzw. ist (z. B. VILKOV & WEIß 2008, ABRAMOVICI et al. 2009, RHENSIUS & DEINDL 2009, REINHART et al. 2011b, REINHART et al. 2012). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf die grundsätzlichen Aspekte der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung eingegangen.

Als Grundlage für eine wirtschaftliche Bewertung müssen zunächst die *Kosten* und der *Nutzen* für ein geplantes Vorhaben ermittelt werden. Die *Kosten* für die Einführung der RFID-Technologie und die zugehörige Integration in betriebliche Planungs- und Informationssysteme lassen sich nach RHENSIUS & DEINDL (2009) nach den Projektphasen der Einführung (Planung, Realisierung und Betrieb) unterteilen. Die *einmaligen Kosten* im Zuge der Realisierung setzen sich aus sach- und personenbezogenen Investitionskosten zusammen. Erstere beinhalten u. a. die Kosten für die System-Infrastruktur (z. B. RFID-Schreib-/Lesegeräte, Antennen und RFID-Transponder) und Software. Ergänzend hierzu sind Personalkosten für Entwicklungstätigkeiten und die Einbindung in bestehende Systeme zu berücksichtigen. In der Betriebsphase entstehen *laufende Kosten* u. a. durch Lizenzgebühren sowie Aufwände für Energie, Wartung und Ersatzinvestitionen. Bei einer unternehmensübergreifenden Nutzung der RFID-Transponder bzw. einer Anwendung über die gesamte Produktlebensdauer fallen zudem laufende Kosten für RFID-Transponder an. Eine Herausforderung bei der Ermittlung der Investitionskosten ist der Umstand, dass bei der Einführung und Integration der RFID-Technologie in vielen Fällen keine Standardlösungen existieren, sondern projektspezifische Anpassungen erfolgen (ABRAMOVICI et al. 2009, RHENSIUS & DEINDL 2009). In diesem Zusammenhang können die unter-

nehmensspezifischen Einsatzbedingungen (z. B. metallisches Umfeld) (REINHART et al. 2007) sowie die individuellen Aufwände zur Integration in betriebliche Planungs- und Informationssysteme als Beispiel genannt werden.

Viele *Nutzaspekte* zum Einsatz von RFID und somit zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen lassen sich in der Regel nicht direkt monetär bewerten. Diese sogenannten *qualitativen Nutzenpotenziale* haben allerdings einen erheblichen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit (ABRAMOVICI et al. 2009). REINHART et al. (2012) haben daher ein Vorgehen zur ganzheitlichen Berücksichtigung von *qualitativen* und *quantitativen Nutzenpotenzialen* vorgeschlagen. *Quantitative Nutzenpotenziale* können demnach direkt bzw. indirekt erfasst und monetär bewertet werden (z. B. Reduzierung von Bearbeitungszeiten). Die charakteristischen Kennzahlen der Simulationsergebnisse aus Abschnitt 8.3 können bspw. als Grundlage für eine quantitative Bewertung des Nutzens verwendet werden. Die *qualitativen Nutzenpotenziale* ermöglichen keine direkte oder indirekte monetäre Bewertung, da keine mathematischen Größen hinterlegt sind. Die Erhöhung der Transparenz in der Werkstattebene ist ein Beispiel für einen qualitativen Nutzen. Ein vielversprechender Ansatz zur Quantifizierung des qualitativen Nutzens ist nach REINHART et al. (2011b) die Nutzung der Fuzzy-Logik.

Vorstehende Ausführungen zeigen, dass für die monetäre Bewertung des Aufwandes und des Nutzens eine umfangreiche Analyse unter Berücksichtigung der unternehmensspezifischen Rahmenbedingungen vorgenommen werden muss. Eine allgemeingültige, monetäre Bewertung des Systems zur produktbasierten Steuerung von Produktionsabläufen kann daher an dieser Stelle nicht durchgeführt werden.

### 8.4.3 Resümee

Zusammenfassend zeigen die prototypische Realisierung und die simulationstechnische Validierung, dass das entwickelte System ein hochvariantenreiches Produktionsprogramm in hochautomatisierten Produktionssystemen effizient handhaben kann. Durch die Verteilung des Steuerungsaufwandes auf globale und lokale Organisationseinheiten wird, unter Berücksichtigung von produkt- und prozessspezifischen Daten, ein zustandsbezogener Fertigungs- und Montageablauf sowie die Erreichung der logistischen Zielgrößen sichergestellt.

---

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Ausgehend von der Fragmentierung der klassischen Massenmärkte im Sinne einer Heterogenisierung der Nachfrage wurden zu Beginn der Arbeit die Gründe für die Entwicklung von kundenindividuellen Produkten aufgezeigt. Diese zunehmende Produktindividualisierung ist verbunden mit einer Erhöhung der Erzeugnisvarianten, die in geringen Stückzahlen hergestellt und trotzdem zu wettbewerbsfähigen Preisen angeboten werden müssen. Die produktionstechnische Umsetzung dieser Differenzierungsstrategie führt zu einer starken Zunahme der Komplexität in der Organisation, Planung und Steuerung von Fertigungs- und Montagevorgängen, die u. a. durch einen heterogenen Fluss an Aufträgen und eine hohe Durchlaufzeitstreuung gekennzeichnet ist. Dies erfordert einen erhöhten Kundenauftragsbezug, der durch eine individuelle Planung und Durchführung von Produktionsaufträgen erreicht werden kann.

Vor dem Hintergrund dieser Rahmenbedingungen und der daraus resultierenden Anforderungen wurde die Nutzung des individuellen Produktes als zusätzliches Element zur Steuerung der Produktion vorgeschlagen. Dieses übergeordnete Ziel wird dadurch erreicht, dass Informationen bezüglich der Konfiguration, des aktuellen Zustandes und der einzelnen Arbeitsvorgänge dezentral am Bauteil gespeichert werden. Moderne Informations- und Kommunikationstechnologien stellen den Befähiger für die resultierende Kopplung des Informationsflusses an die jeweiligen Werkstücke in der Produktion dar. Die sogenannten intelligenten Produkte gewährleisten, dass die richtige Menge an Informationen zur richtigen Zeit am richtigen Ort und in der richtigen Qualität zur Verfügung gestellt wird.

Für die effiziente Handhabung eines hochvariantenreichen Produktionsprogramms in einem hochautomatisierten Umfeld wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage entwickelt. Das System besteht aus einem Datenmodell für adaptive Produktionssysteme, einem wissensbasierten System zum autonomen Störungsmanagement und einer Organisationsstruktur, welche die Integration des intelligenten Produktes als zusätzliches Element zur Steuerung der Produktion ermöglicht. Diese Teilelemente werden nachfolgend beschrieben.

Das *Datenmodell für adaptive Produktionssysteme* bildet sämtliche Daten, die für die Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen relevant sind, strukturiert ab. Auf Basis der anerkannten Grundelemente *Produkt* und *Prozess* erfolgt die ressourcenneutrale, bausteinbasierte Beschreibung von Arbeitsvorgängen. Die einzelnen Prozessbausteine werden zu einer sogenannten produktindividuel-

len Prozesskette zusammengesetzt. Die Petri-Netz-basierte Darstellung der produktindividuellen Prozesskette ermöglicht die Abbildung von strukturellen Freiheitsgraden bei der Maschinenbelegung und der Arbeitsvorgangsreihenfolge sowie alternativer Arbeitsvorgänge. Mit Hilfe des Grundelementes *Ressource* werden die statischen und dynamischen Informationen der zur Verfügung stehenden Maschinen und Anlagen eines Produktionssystems repräsentiert. Das Datenmodell bildet die Grundlage für die logistische Beherrschbarkeit von Fertigungs- und Montageabläufen und gewährleistet eine hohe Robustheit bei produkt- und ressourcenbezogenen Störungen.

Als wesentliches Element zur Erreichung einer produktzustandsbezogenen Steuerung von Fertigungs- und Montageabläufen wurde das *wissensbasierte System zum autonomen Störungsmanagement* entwickelt. Unter Anwendung von produktunabhängigen und produktabhängigen Regeln erlaubt das wissensbasierte System die Identifizierung von unzulässigen Merkmalsabweichungen und die Ableitung von möglichen Handlungsmaßnahmen. Bei einer unzureichenden Werkstückqualität werden zusätzliche Prozessbausteine in die vorhandene produktindividuelle Prozesskette integriert und der nachfolgende Produktionsablauf adaptiert.

Aufbauend auf dem Datenmodell und dem wissensbasierten Störungsmanagement wurde die *Organisationsstruktur* für das System zur produktbasierten Steuerung hergeleitet. Die ausgewählte hybride Organisationsstruktur verbindet die Vorteile einer zentralen Koordination und einer hohen Flexibilität durch dezentrale Entscheidungsfreiräume. Durch einen rechnergestützten Anforderungen-Fähigkeiten-Abgleich erstellt die globale Organisationseinheit zum Zeitpunkt der Auftragsfreigabe einen optimalen Routenplan für die Herstellung des Produktes. Die produktindividuelle Prozesskette mit den zugehörigen Planungsergebnissen wird auf dem intelligenten Produkt hinterlegt. Dieser als solches bezeichnete „Informationsrucksack“ mit den initialen Anforderungen an den Wertschöpfungsprozess dient als Grundlage für die Selbststeuerung des Produktes durch die Fertigung und Montage. Unter Berücksichtigung der produkt- und der prozessspezifischen Daten sowie der Planungsfunktionen, die in den sogenannten Planungsbibliotheken der lokalen Organisationseinheiten hinterlegt sind, wird die stationsbezogene Feinplanung durchgeführt. Die Verlagerung von Entscheidungsfunktionen in die Werkstattebene und die Berücksichtigung der Informationen auf dem intelligenten Produkt führen zu einer hohen Robustheit gegenüber Störungen und Planabweichungen.

Die prototypische Umsetzung des Systems an einer produktionstechnischen Versuchsanlage hat zu dem Nachweis geführt, dass die Steuerung von Produktions-

---

ablaufen in Abhängigkeit des Produktzustandes und des Fabrikkontextes (z. B. Verfügbarkeit von Ressourcen) mit den vorgestellten Teilelementen möglich ist. Eine Erhöhung der Robustheit bei unvorhergesehenen Ereignissen und eine Verbesserung der logistischen Zielgrößen wurden mit Hilfe einer Simulation deutlich gemacht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das intelligente Produkt insbesondere für die Steuerung von innerbetrieblichen Fertigungs- und Montageabläufen eingesetzt. Ein Ansatzpunkt für zukünftige Forschungsarbeiten ist die Erweiterung und Befähigung des Systems zur Erfassung von produktspezifischen Betriebsdaten. Dies wird als vielversprechender Ansatz für die erfahrungsbasierte Pflege und Wartung von Stammdaten in Systemen zur Produktionsplanung gesehen. In Ergänzung hierzu können die intelligenten Produkte mit den zugehörigen Daten als Grundlage für eine überbetriebliche Optimierung von Abläufen und für ein effizientes Störungsmanagement genutzt werden. In diesem Zusammenhang wird vorgeschlagen, in weiterführenden Arbeiten eine unternehmensübergreifende Organisationsstruktur zur Planung und Steuerung von Wertschöpfungsprozessen zu entwickeln.



---

## 10 Literaturverzeichnis

ABEL 1990

Abel, D.: Petri-Netze für Ingenieure: Modellbildung und Analyse diskret gesteuerter Systeme. Berlin: Springer 1990. ISBN: 3540518142.

ABELE & REINHART 2011

Abele, E.; Reinhart, G.: Zukunft der Produktion: Herausforderungen, Forschungsfelder, Chancen. 1. Aufl. 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.

ALTMANN 1991

Altmann, C.: Dynamische Prozeßgestaltung in flexiblen Fertigungssystemen durch integrierte Arbeitsvorbereitung. Diss. Technische Universität Berlin. München: Carl Hanser 1991 (Produktionstechnik - Berlin, Nr. 95).

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.

BAUMBERGER 2007

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

BECKENDORFF 1991

Beckendorff, U.: Reaktive Belegungsplanung für die Werkstattfertigung. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Nr. 232).

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).

BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008

Beierle, C.; Kern-Isberner, G.: Methoden wissensbasierter Systeme: Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen. 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2008. ISBN: 9783834805041.

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.

BILLINGTON et al. 2003

Billington, J.; Christensen, S.; van Hee, K.; Kindler, E.; Kummer, O.; Petrucci, L.; Post, R.; Stehno, C.; Weber, M.: The Petri Net Markup Language: Concepts, Technology, and Tools. In: van der Aalst, W. et al. (Hrsg.): Applications and Theory of Petri Nets 2003. Berlin: Springer 2003, S. 483-505. ISBN: 3540403345.

BLATTBERG & GLAZER 1994

Blattberg, R. C.; Glazer, R.: Marketing in the Information Revolution. In: Blattberg, R. C. et al. (Hrsg.): The Marketing Information Revolution. Boston: Harvard Business School Press 1994, S. 9-29. ISBN: 0875843298.

BODENDORF 2006

Bodendorf, F.: Daten- und Wissensmanagement. 2. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540287438.

---

BOLEY 2001

Boley, H.: The Rule Markup Language: RDF-XML data model, XML schema hierarchy, and XSL transformations. In: Bartenstein, O. et al. (Hrsg.): Web Knowledge Management and Decision Support. Berlin: Springer 2001, S. 5-22. ISBN: 354000680X.

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.

BORNHÄUSER et al. 2005

Bornhäuser, M.; Lickefett, M.; Westkämper, E.: Taktororientierte Fertigungssteuerung. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 5, S. 396-404.

BORNHÄUSER 2009

Bornhäuser, M.: Reifegradbasierte Werkstattsteuerung. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2009 (IPA-IAO Forschung und Praxis, Nr. 485).

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.

BRASSLER & SCHNEIDER 2001

Brassler, A.; Schneider, H.: Valuation of strategic production decisions. *International Journal of Production Economics* 69 (2001) 2, S. 119-127.

BRINZER 2005

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

BROWNE et al. 1984

Browne, J.; Dubois, D.; Rathmill, K.; Sethi, S. P.; Stecke, K. E.: Classification of flexible manufacturing systems. *The FMS Magazine* 2 (1984), S. 114-117.

- 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.
- BULLINGER 1993  
Bullinger, H.-J.: Werkstattsteuerung mit Leitständen. Technica (1993) 10, S. 14-21.
- BURGER 1992  
Burger, C.: Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen. Diss. Technische Universität München. Berlin: Springer 1992 (Forschungsberichte *iwb* 42).
- 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.
- COATES 1995  
Coates, J. F.: Customization promises sharp competitive edge. Research Technology Management 38 (1995) 6, S. 6-7.
- CZAJA & VOIGT 2009  
Czaja, L.; Voigt, K.-I.: Störungen und Störungsauslöser in automobilen Wertschöpfungsnetzwerken - Ergebnisse einer empirischen Untersuchung in der deutschen Automobilzulieferindustrie. In: Specht, D. (Hrsg.): Weiterentwicklung der Produktion. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2009, S. 1-17. ISBN: 9783834918307.
- 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.
- 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. 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. 1993  
Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN 2330: Begriffe und  
Benennungen - Allgemeine Grundsätze. Berlin: Beuth 1993.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003a  
Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN 8589:  
Fertigungsverfahren Spanen. Berlin: Beuth 2003.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003b  
Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN 8580:  
Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth 2003.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003c  
Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN 8593:  
Fertigungsverfahren Fügen. Berlin: Beuth 2003.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2003d  
Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN 8590:  
Fertigungsverfahren Abtragen. Berlin: Beuth 2003.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2008  
Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN EN ISO 1101 -  
Geometrische Produktspezifikation (GPS), Geometrische Tolerierung -  
Tolerierung von Form, Richtung, Ort und Lauf. Berlin: Beuth 2008.
- DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (DIN) E.V. 2010  
Deutsches Institut für Normung (DIN) e.V.: DIN EN ISO 286-1 -  
Geometrische Produktspezifikation (GPS), ISO-Toleranzsystem für  
Längenmaße - Teil 1: Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und  
Passungen. Berlin: Beuth 2010.
- 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  
40<sup>th</sup> 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: 3528356618.

DOBBERSTEIN 1997

Dobberstein, M.: Optimierung von Steuerungsstrukturen in  
dezentralisierten Produktionssystemen. Diss. RWTH Aachen. Aachen:  
Shaker 1997 (Berichte aus der Produktionstechnik, Band 22/97).

DOMSCHKE & DREXL 2005

Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. 6. Aufl.  
Berlin: Springer 2005. ISBN: 3540234314.

DUDEN 2010

Duden: Das Fremdwörterbuch. 10. Aufl. Mannheim: Bibliographisches  
Institut 2010. ISBN: 9783411040605.

DYLA 2002

Dyla, A.: Modell einer durchgängigen rechnerbasierten  
Produktentwicklung. Diss. Technische Universität München. 2002.

DYLLA 1991

Dylla, N.: Denk- und Handlungsabläufe beim Konstruieren. Diss.  
Technische Universität München. München: Carl Hanser 1991.

EHRENSPIEL 2009

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe,  
Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 4. Aufl. München: Carl Hanser 2009.  
ISBN: 9783446420137.

EIDENMÜLLER 1995

Eidenmüller, B.: Die Produktion als Wettbewerbsfaktor: Das Potential der  
Mitarbeiter nutzen - Herausforderung an das Produktionsmanagement. 3.  
Aufl. Köln: TÜV Rheinland 1995. ISBN: 3824901811.

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 & WIENDAHL 2009

ElMaraghy, H. A.; Wiendahl, H.-P.: Changeability – An Introduction. In: ElMaraghy, H. A. (Hrsg.): Changeable and Reconfigurable Manufacturing Systems. London: Springer 2009, S. 3-24. ISBN: 9781848820661.

EVERSHEIM 1989

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik - Band 4: Fertigung und Montage. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. ISBN: 318400841X.

EVERSHEIM 1992

Eversheim, W.: Störungsmanagement in der Montage: Erfolgreiche Einzel- und Kleinserienproduktion. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3184012522.

EVERSHEIM 1996

Eversheim, W.: Ausprägungen der Produktionsplanung und -steuerung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management: Betriebshütte. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 14-60 - 14-82. 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.

FLEISCH & MATTERN 2005

Fleisch, E.; Mattern, F.: Das Internet der Dinge: Ubiquitous computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3540240039.

FORD & CROWTHER 1922

Ford, H.; Crowther, S.: My life and work. Doubleday, Page & Co. 1922.

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.

GECK-MÜGGE & WIEDENMANN 1993

Geck-Mügge, K.; Wiedenmann, H.: Das Informationsmodell der Fertigungssteuerung. In: Dangelmaier, W. et al. (Hrsg.): Modell der Fertigungssteuerung. 1. Aufl. Berlin: Beuth 1993, S. 9-68. ISBN: 3410129227.

GRUNWALD 2002

Grunwald, S.: Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2002 (Forschungsberichte *iwb* 159).

GÜNTHER & TEMPELMEIER 2009

Günther, H.-O.; Tempelmeier, H.: Produktion und Logistik. 8. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783642003790.

GÜNTHNER et al. 2006

Günthner, W. A.; Wilke, M.; Zäh, M. F.; Aull, F.; Rudolf, H.: Produktion individualisierter Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006, S. 63-87. ISBN: 9783540342748.

GUTENBERG 1976

Gutenberg, E.: Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Band 1: Die Produktion. 22. Aufl. Berlin: Springer 1976. ISBN: 3540056947.

---

HACKSTEIN 1984

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS): Ein Handbuch für die Betriebspraxis. Düsseldorf: VDI-Verlag 1984. ISBN: 3184006107.

HAUN 2000

Haun, M.: Wissensbasierte Systeme: Eine praxisorientierte Einführung. Renningen: expert verlag 2000. ISBN: 3816916775.

HEIDERICH 2001

Heiderich, T.: Informationsflüsse nach ungeplanten Ereignissen in der technischen Auftragsabwicklung. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 2001 (Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Band 40).

HEIL 1995

Heil, M.: Entstörung betrieblicher Abläufe. Diss. Technische Universität München. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1995 (Gabler Edition Wissenschaft).

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).

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.

HOFMANN 1990

Hofmann, P.: Fehlerbehandlung in flexiblen Fertigungssystemen: Einführung für Hersteller und Anwender. München: Oldenbourg 1990. ISBN: 3486217844.

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: 5<sup>th</sup> International Conference on Digital Enterprise Technology (DET 2008). 22.-24.10.2008. Nantes, France: 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 - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 1: Überblick und grundlegende Prinzipien. Berlin: Beuth 1996.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO) 2011

International Organization for Standardization (ISO): ISO/IEC 15909-2: Software und System-Engineering - Höhere Petri-Netze - Teil 2: Transferformat. Berlin: Beuth 2011.

JONAS 2000

Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2000 (Forschungsberichte *iwb* 145).

---

JÜNEMANN & BEYER 1998

Jünemann, R.; Beyer, A.: Steuerung von Materialfluß- und Logistiksystemen. 2. Aufl. Berlin: Springer 1998. ISBN: 3540645144.

KALUZA 1984

Kaluza, B.: Flexibilität der Produktionsvorbereitung industrieller Unternehmen. In: Kortzfleisch, G. v. et al. (Hrsg.): Internationale und nationale Problemfelder der Betriebswirtschaftslehre. Berlin: Duncker & Humblot 1984, S. 287-333. ISBN: 3428056965.

KALUZA & BLECKER 2005

Kaluza, B.; Blecker, T.: Flexibilität - State of the Art und Entwicklungstrends. In: Kaluza, B. et al. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Flexibilität: Strategien und Konzepte für wandlungsfähige Unternehmen. Berlin: Schmidt 2005, S. 1-25. ISBN: 3503083677.

KERN 2007

Kern, C.: Anwendung von RFID-Systemen. 2. Aufl. Berlin: Springer 2007. ISBN: 3540444777.

KIM 1995

Kim, M.-H.: Rechnerunterstütztes Störmanagementsystem in der Produktion. Diss. Technische Universität Braunschweig. Düsseldorf: VDI-Verlag 1995 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 8, Nr. 492).

KLAUKE 2002

Klauke, S.: Methoden und Datenmodell der "Offenen Virtuellen Fabrik" zur Optimierung simultaner Produktionsprozesse. Diss. Technische Universität Dresden. Düsseldorf: VDI-Verlag 2002 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 20, Nr. 360).

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. Ghent, Belgien: Society for Computer Simulation International 2000, S. 13-29. ISBN: 1565551826.

KLUBMANN 2009

Klußmann, 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 5/2005).

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: Springer 2008, S. 289-292. ISBN: 9781848002678.

KRÄKEL 2007

Kräkel, M.: Organisation und Management. 3. Aufl. Tübingen: Mohr Siebeck 2007. ISBN: 9783161492587.

KRÄMER 2002

Krämer, K.: Automatisierung in Materialfluss und Logistik: Ebenen, Informationslogistik, Identifikationssysteme, intelligente Geräte. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2002. ISBN: 3824421526.

KRCMAR 2005

Krcmar, H.: Informationsmanagement. 4. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 3540230157.

KURBEL 1992

Kurbel, K.: Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen: Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme. 2. Aufl. Berlin: Springer 1992. ISBN: 3540552375.

KURBEL 2005

Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. 6. Aufl. München: Oldenbourg 2005. ISBN: 3486575783.

---

LAMPE et al. 2005

Lampe, M.; Flörkemeier, C.; Haller, S.: Einführung in die RFID-Technologie. 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. 69-86. ISBN: 3540240039.

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.

LESCHKA 1996

Leschka, S.: Fallbasiertes Störungsmanagement in flexiblen Fertigungssystemen. Diss. Universität Paderborn. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 1996 (HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 15).

LI 2001

Li, R.: Agentenbasierte NC-Planung für die Komplettbearbeitung auf Dreh-/Fräszentren. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2001 (ISW Forschung und Praxis, Nr. 137).

LINDEMANN & BAUMBERGER 2006

Lindemann, U.; Baumberger, G. C.: Individualisierte Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006, S. 7-16. ISBN: 9783540342748.

LINDEMANN et al. 2006

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F.: Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540342748.

LINDEMANN 2009

Lindemann, U.: Methodische Entwicklung technischer Produkte: Methoden flexibel und situationsgerecht anwenden. 3. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783642014222.

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.

LÖDDING 2001

Lödding, H.: Dezentrale Bestandsorientierte Fertigungsregelung. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Nr. 587).

LÖDDING 2008a

Lödding, H.: Ein Modell der Fertigungssteuerung – Logistische Ziele systematisch erreichen. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer 2008, S. 219-233. ISBN: 3540756418.

LÖDDING 2008b

Lödding, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung: Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 3540768599.

LOPITZSCH 2005

Lopitzsch, J. R.: Segmentierte adaptive Fertigungssteuerung. Diss. Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2005 (Berichte aus dem IFA, Band 03/2005).

LOTTER et al. 1998

Lotter, B.; Hartel, M.; Menges, R.: Manuelle Montage - wirtschaftlich gestalten: Neuzeitliche Analysen und Planungsmethoden zur Montagerationalisierung. Renningen-Malmsheim: expert 1998. ISBN: 3816915779.

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.

---

MEHREZ et al. 1995

Mehrez, A.; Muzumdar, M.; Acar, W.; Weinroth, G.: A Petri Net model view of decision making: an operational management analysis. Omega 23 (1995) 1, S. 63-78.

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 1990

Mertens, P.: Expertensysteme in der Produktion: Praxisbeispiele aus Diagnose und Planung; Entscheidungshilfen für den wirtschaftlichen Einsatz. München: Oldenbourg 1990. ISBN: 3486215493.

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.

MERTENS et al. 2005

Mertens, P.; Bodendorf, F.; König, W.; Picot, A.; Schumann, M.; Hess, T.: Grundzüge der Wirtschaftsinformatik. 9. Aufl. Berlin: Springer 2005. ISBN: 354023411X.

MINTZBERG 1988

Mintzberg, H.: Generic strategies: toward a comprehensive framework. In: Lamb, R. et al. (Hrsg.): Advances in Strategic Management. Greenwich, Connecticut: JAI Press 1988, S. 1-67. ISBN: 08923276695.

MORYSON 2004

Moryson, R.: Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung. Diss. ETH Zürich. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 20, Nr. 388).

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).

NEBENDAHL 1987

Nebendahl, D.: Expertensysteme: Einführung in Technik und Anwendung. Berlin: Siemens Aktiengesellschaft 1987. ISBN: 3800914956.

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 2008

Nyhuis, P.: Produktionskennlinien – Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer 2008, S. 184-218. ISBN: 3540756418.

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 Gentelliger Technologie. *Industrie Management* 25 (2009) 2, S. 13-16.

NYHUIS & WIENDAHL 2009

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: *Fundamentals of Production Logistics: Theory, Tools and Applications*. Berlin: Springer 2009. ISBN: 9783540342106.

OSTGATHE et al. 2011

Ostgathe, M.; Zäh, M. F.; Grimmert, P.; Schöler, T.: Wissensbasiertes Störungsmanagement in Produktionsabläufen. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 106 (2011) 11, S. 838-843.

PAIS & SYMONDS 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.

PETRI 1962

Petri, C. A.: *Kommunikation mit Automaten*. Diss. Universität Bonn. Bonn: 1962 (Institut für Instrumentelle Mathematik).

PFOHL 2010

Pfohl, H.-C.: *Logistiksysteme: Betriebswirtschaftliche Grundlagen*. 8. Aufl. Berlin: Springer 2010. ISBN: 9783642041617.

PICOT et al. 2003

Picot, A.; Reichwald, R.; Wigand, R. T.: *Die grenzenlose Unternehmung: Information, Organisation und Management*. 5. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2003. ISBN: 9783834921628.

PILLER & STOTKO 2003

Piller, F. T.; Stotko, C. M.: *Mass Customization und Kundenintegration: Neue Wege zum innovativen Produkt*. 1. Aufl. Düsseldorf: Symposium-Verlag 2003. ISBN: 3936608059.

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.

PRIESE 2007

Priese, J.: Verfahren zur durchgehenden dezentralen Planung in Werkstattstrukturen. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2007 (ISW Forschung und Praxis, Nr. 169).

PRIESE & WIMMEL 2008

Priese, L.; Wimmel, H.: *Petri-Netze*. 2. Aufl. Berlin: Springer 2008. ISBN: 9783540769705.

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.

PUPPE 1988

Puppe, F.: *Einführung in Expertensysteme*. Berlin: Springer 1988. ISBN: 3540194819.

QIU 2007

Qiu, R.: RFID-enabled automation in support of factory integration. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 23 (2007) 6, S. 677-683.

RECHENBERG & POMBERGER 2006

Rechenberg, P.; Pomberger, G.: *Informatik Handbuch*. 4. Aufl. München: Carl Hanser 2006. ISBN: 9783446401853.

REHÄUSER & KRCMAR 1996

Rehäuser, J.; Krcmar, H.: Wissensmanagement im Unternehmen. In: Schreyögg, G. et al. (Hrsg.): *Managementforschung 6: Wissensmanagement*. Berlin: de Gruyter 1996, S. 1-40. ISBN: 3110149990.

---

REICHWALD & PILLER 2002

Reichwald, R.; Piller, F. T.: Mass Customization - Konzepte im Electronic Business. In: Weiber, R. (Hrsg.): Handbuch Electronic Business: Informationstechnologien - Electronic Commerce - Geschäftsprozesse. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2002, S. 469-494. ISBN: 3409216367.

REICHWALD et al. 2006a

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.

REICHWALD et al. 2006b

Reichwald, R.; Moser, K.; Schlichter, J.; Leckner, T.; Stegmann, R.: Marketing- und Vertriebswerkzeuge für individualisierte Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006, S. 19-39. ISBN: 9783540342748.

REINHART et al. 2007

Reinhart, G.; Ostgathe, M.; Wiesbeck, M.: Einführungsstrategien für RFID in produzierenden Unternehmen. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): RFID in der Produktion: Wertschöpfung effizient gestalten. München: Utz 2007, S. 1-1 - 1-22. ISBN: 9783896750891.

REINHART & TEKOUO 2009

Reinhart, G.; Tekouo, W.: Automatic programming of robot-mounted 3D optical scanning devices to easily measure parts in high-variant assembly. *Annals of the CIRP* 58 (2009) 1, S. 25-28.

REINHART et al. 2010

Reinhart, G.; Philipp, T.; Ostgathe, M.: Einsatz von RFID bei der Herstellung von Faserverbundwerkstoffen. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 9, S. 785-790.

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  
Nutzenauswahl in der Wirtschaftlichkeitsbewertung von RFID. ZWF -  
Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 107 (2012) 3, S. 182-186.

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. (FIR-Edition Studien.

RÖHRIG 2002

Röhrig, M.: Variantenbeherrschung mit hochflexiblen  
Produktionsendstufen. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-  
Verlag 2002 (Fortschritt-Berichte VDI: Reihe 2, Nr. 622).

ROPOHL 2009

Ropohl, G.: Allgemeine Technologie: Eine Systemtheorie der Technik. 3.  
Aufl. Karlsruhe: Universitätsverlag Karlsruhe 2009. ISBN:  
9783866443747.

RUDOLF 2007

Rudolf, H.: Wissensbasierte Montageplanung in der digitalen Fabrik am  
Beispiel der Automobilindustrie. Diss. Technische Universität München.  
München: Utz 2007 (Forschungsberichte *iwb* 204).

SACKMANN 2003

Sackmann, D.: Ablaufplanung mit Petrinetzen: Spezifikation eines  
entscheidungsorientierten Modellierungsansatzes. Diss. Universität  
Würzburg. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2003 (Gabler  
Edition Wissenschaft).

SCHIRRMEISTER et al. 2003

Schirrmeister, E.; Warnke, P.; Dreher, C.: Untersuchung über die Zukunft  
der Produktion in Deutschland: Sekundäranalyse von Vorausschau-  
Studien für den europäischen Vergleich. Karlsruhe: Fraunhofer-Institut für  
Systemtechnik und Innovationsforschung (ISI) 2003.

---

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.

SCHOLZ-REITER et al. 2008

Scholz-Reiter, B.; de Beer, C.; Freitag, M.; Hamann, T.; Rekersbrink, H.; Tervo, J. T.: Dynamik logistischer Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin: Springer 2008, S. 109-138. ISBN: 3540756418.

SCHÖNSLEBEN 2001

Schönsleben, P.: Integrales Informationsmanagement: Informationssysteme für Geschäftsprozesse; Management, Modellierung, Lebenszyklus und Technologie. 2. Aufl. Berlin: Springer 2001. ISBN: 3540417125.

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.: Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540403067.

SCHUH & GIERTH 2006a

Schuh, G.; Gierth, A.: Gestaltung der Produktionsplanung und -steuerung. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 295-303. ISBN: 9783540403067.

SCHUH & GIERTH 2006b

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 et al. 2006

Schuh, G.; Gierth, A.; Schiegg, P.: Grundlagen der Produktionsplanung und -steuerung: Prozessarchitektur. In: Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung: Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin: Springer 2006, S. 81-107. 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 & 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.

SCHULTE-ZURHAUSEN 2005

Schulte-Zurhausen, M.: Organisation. 4. Aufl. München: Vahlen 2005. ISBN: 3800632055.

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.

---

SEBESTYEN 2010

Sebestyen, T. J.: XML: Einstieg für Anspruchsvolle. München: Addison-Wesley 2010. ISBN: 9783827326546.

SEDGEWICK 1992

Sedgewick, R.: Algorithmen in C. 1. Aufl. Bonn: Addison-Wesley 1992. ISBN: 3893193766.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A. K.; Sethi, S. P.: Flexibility in manufacturing: A survey. International Journal of Flexible Manufacturing Systems 2 (1990) 4, S. 289-328.

SIMON 1995

Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement. Diss. Technische Universität München. Berlin: Springer 1995 (Forschungsberichte *iwb* 85).

SONNENSCHHEIN 1998

Sonnenschein, K.: Feinplanung in flexiblen Fertigungssystemen. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 1998 (Berichte aus der Produktionstechnik, Band 23/98).

SOPRO 2011

SoPro - Selbstorganisierende Produktion <<https://e-services.ipk.fraunhofer.de/sopro/>> 09.05.2011.

SPATH et al. 1996

Spath, D.; Weck, M.; Seliger, G.: Produktionssysteme. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management: Betriebshütte. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 10-1 - 10-35 ISBN: 0387593608.

SPRECKELSEN & SPITZER 2009

Spreckelsen, C.; Spitzer, K.: Wissensbasen und Expertensysteme in der Medizin. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2009. ISBN: 9783834892942.

STEINWASSER 1996

Steinwasser, P.: Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach 1996 (Fertigungstechnik - Erlangen; Nr. 63).

STICKEL 2001

Stickel, E.: Informationsmanagement. München: Oldenbourg 2001. ISBN: 3486255908.

TEUNIS 2003

Teunis, G.: Engpassorientierte Werkstattsteuerung für teilautonome, kooperative Fertigungen. Diss. Universität Hannover. Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2003 (Berichte aus dem IFW, Band 02/2003).

TITTMANN 2003

Tittmann, P.: Graphentheorie: Eine anwendungsorientierte Einführung. München: Carl Hanser 2003. ISBN: 3446223436.

TONIGOLD 2008

Tonigold, C.: Programm-, Ressourcen- und Prozessoptimierung als Bestandteile der Anpassungsplanung von spanenden Fertigungssystemen in der Fließfertigung von Aggregaten. Diss. Universität Paderborn. Paderborn: Heinz Nixdorf Institut 2008 (HNI-Verlagsschriftenreihe, Band 230).

TRENTESAUX 2009

Trentesaux, D.: Distributed control of production systems. Engineering Applications of Artificial Intelligence 22 (2009), S. 971-978.

VAHS 2007

Vahs, D.: Organisation: Einführung in die Organisationstheorie und -praxis. 6. Aufl. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2007. ISBN: 9783791026626.

VDI-RICHTLINIE 2815 1978

VDI-Richtlinie 2815: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung, Blatt 5: Betriebsmittel. Berlin: Beuth 1978.

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 1992

VDI: Lexikon der Produktionsplanung: Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3184010066.

VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION (REFA) 1993

Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation (REFA): Lexikon der Betriebsorganisation. 1. Aufl. München: Carl Hanser 1993. ISBN: 3446175237.

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.

VONHOEGEN 2007

Vonhoegen, H.: Einstieg in XML - Grundlagen, Praxis, Referenzen. 4. Aufl. Bonn: Galileo Press 2007. ISBN: 9783836210744.

WEBER 2002

Weber, M.: Allgemeine Konzepte zur software-technischen Unterstützung verschiedener Petrinetz-Typen. Diss. Humboldt-Universität zu Berlin. Berlin: 2002.

WEBER & KINDLER 2003

Weber, M.; Kindler, E.: The Petri Net Markup Language In: Ehrig, H. et al. (Hrsg.): Petri Net Technology for Communication-Based Systems. Berlin: Springer 2003, S. 124-144. ISBN: 3540205381.

WEIMER 2010

Weimer, T.: Informationsmodell für die durchgängige Datennutzung in Fabrikplanung und -betrieb. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2010 (ISW/IPA Forschung und Praxis, Nr. 176).

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 - 3<sup>rd</sup> 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.

WESTKÄMPER & ZAHN 2009

Westkämper, E.; Zahn, E.: Wandlungsfähige Produktionsunternehmen: Das Stuttgarter Unternehmensmodell. 1. Aufl. Berlin: Springer 2009. ISBN: 3540218890.

WIENDENMANN 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).

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 2008a

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 1996a

Wiendahl, H.-P.: Modelle und Systeme des Produktionscontrolling. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management: Betriebshütte. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 18-32 - 18-63. ISBN: 0387593608.

WIENDAHL 1996b

Wiendahl, H.-P.: Produktionsplanung und -steuerung - Aufgabenstellung und Zielkonflikte. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management: Betriebshütte. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 14-1 - 14-10. 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 2008b

Wiendahl, H.-P.: Logistikorientierte Kennzahlensysteme und -kennlinien. In: Arnold, D. et al. (Hrsg.): Handbuch Logistik. 3. Aufl. Berlin: Springer 2008, S. 228-248. ISBN: 9783540729297.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München: Carl Hanser 2010. ISBN: 9783446418783.

WILDEMANN 1995

Wildemann, H.: Entstörmangement als PPS-Funktion. 2. Aufl. München: TCW-Transfer-Centrum-Verlag 1995. ISBN: 3929918064.

WILDEMANN 1998

Wildemann, H.: Die modulare Fabrik: Kundennahe Produktion durch Fertigungssegmentierung. 5. Aufl. München: TCW-Transfer-Centrum-Verlag 1998. ISBN: 3931511197.

WILDEMANN 2009a

Wildemann, H.: Auftragsabwicklungsprozess: Leitfaden für eine kundenorientierte Neuausrichtung und Kundenbindung. 15. Aufl. München: TCW-Verlag 2009. ISBN: 9783929918861.

WILDEMANN 2009b

Wildemann, H.: Variantenmanagement: Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung in Produkt und Prozess. 17. Aufl. München: TCW-Verlag 2009. ISBN: 9783929918175.

WINDT & HÜLSMANN 2007

Windt, K.; Hülsmann, M.: Changing Paradigms in Logistics - Understanding the Shift from Conventional Control to Autonomous Cooperation and Control. 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. 1-16. ISBN: 9783540474494.

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.

WITTMANN 1959

Wittmann, W.: Unternehmung und unvollkommene Information. Köln: Westdeutscher Verlag 1959.

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 et al. 2010

Zaeh, M. F.; Reinhart, G.; Ostgathe, M.; Geiger, F.; Lau, C.: A holistic approach for the cognitive control of production systems. *Advanced Engineering Informatics* 24 (2010) 3, S. 300-307.

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.

ZÄH et al. 2010

Zäh, M. F.; Ostgathe, M.; Wiesbeck, M.: Ganzheitliches Datenmodell für kognitive Produktionssysteme. *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 105 (2010) 4, S. 309-315.

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.): 5<sup>th</sup> International Conference on Digital Enterprise Technology (DET 2008). 22.-24.10.2008. Nantes, France: 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.



---

# 11 Anhang

## 11.1 Verzeichnis betreuter 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 Studienarbeiten betreut. Diese haben sich mit Fragestellungen der Produktionsplanung und -steuerung im Allgemeinen und der adaptiven Steuerung von Produktionsabläufen im Besonderen 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.

EBERT, J.

Implementierung und Validierung eines RFID-basierten Produktionssteuerungsansatzes, eingereicht im Mai 2011. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 8.2.2.3 eingegangen.

GRIMMERT, P.

Entwicklung eines wissensbasierten Ansatzes zum autonomen Störungsmanagement in der Kognitiven Fabrik, eingereicht im März 2011. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 6.2, 6.3, 6.4 und 8.2.2.4 eingegangen.

SCHIWALL, K.

Entwicklung eines Steuerungsansatzes für die auftragsbezogene Produktion, eingereicht im April 2010. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 7.2 und 7.4 eingegangen.

SCHWARZMAIER, C.

Entwicklung eines ganzheitlichen Datenmodells für kognitive Produktionssysteme, eingereicht im Oktober 2010. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 5.2 und 5.3 eingegangen.

STANGL, A.

Entwicklung einer dezentralen Organisationseinheit für die RFID-basierte, hybride Produktionssteuerung in der Kognitiven Fabrik, eingereicht im Oktober 2011. Teile der Studienarbeit sind in die Abschnitte 5.3 und 8.2.2.3 eingegangen.

ZHANG, S.

Simulationsbasierte Validierung eines RFID-basierten Ansatzes zur Produktionssteuerung, eingereicht im November 2011. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 8.3.3 eingegangen.

## 11.2 Genutzte Softwareprodukte

*Microsoft InfoPath*<sup>®</sup>

Microsoft Deutschland GmbH, Konrad-Zuse-Straße 1, 85716 Unterschleißheim

*Microsoft Visual Studio*<sup>®</sup>

Microsoft Deutschland GmbH, Konrad-Zuse-Straße 1, 85716 Unterschleißheim

*Oxygen XML-Editor*<sup>®</sup>

SyncRO Soft Ltd., str. Fermei, nr. 42, Craiova 200782, Rumänien

*Plant Simulation*<sup>®</sup>

Siemens Industry Software GmbH & Co. KG, Franz-Geuer-Straße 10, 50823  
Köln

*WoPeD* (Workflow Petri Net Designer)

Open-Source-Software zur Modellierung von Petri-Netzen: [www.woped.org](http://www.woped.org)