

Lehrstuhl für
Betriebswissenschaften und Montagetechnik
der Technischen Universität München

System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten

Florian Geiger

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. M. Zäh

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. W. A. Günthner

Die Dissertation wurde am 24.02.2015 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 08.10.2015 angenommen.

Florian Geiger

**System zur wissensbasierten
Maschinenbelegungsplanung auf Basis
produktspezifischer Auftragsdaten**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 311

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

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2015

ISBN 978-3-8316-4537-4

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

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

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

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Mitglied der Institutsleitung am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München (TUM) sowie als Abteilungsleiter an der Projektgruppe für Ressourceneffiziente mechatronische Verarbeitungsmaschinen (RMV) des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU in Augsburg.

Mein besonderer Dank gilt hierbei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh, den Leitern des *iwb*, für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Willibald Günthner, dem Leiter des Lehrstuhls für Fördertechnik Materialfluss Logistik (fml) der Technischen Universität München (TUM), möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Ein besonderer Dank gilt hier Philipp Engelhardt, Andreas Hees und Tobias Philipp für die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit und die wertvollen Diskussionen dieses Themenkomplexes.

An dieser Stelle möchte ich mich auch ganz herzlich bei meiner Familie bedanken. Ohne das entgegengebrachte Verständnis und die Geduld meiner Frau Kerstin, die mir über die gesamte Zeit den Rücken freigehalten und mir somit den notwendigen Freiraum für die Erstellung meiner Doktorarbeit geschaffen hat, hätte ich dieses Ziel nicht erreichen können. Zu guter Letzt danke ich auch meinen Kindern Helena und Karl, die in dieser Zeit häufig auf ihren Papa verzichten mussten, jedoch mir immer gezeigt haben, was das Wichtigste im Leben ist.

München, im November 2015

Florian Geiger

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Verzeichnis der Abkürzungen.....	V
Verzeichnis der Formelzeichen	IX
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Problembeschreibung	2
1.3 Zielstellung der Arbeit.....	5
1.4 Aufbau der Arbeit.....	7
2 Grundlagen	11
2.1 Übersicht.....	11
2.2 Flexibilität in der Produktion.....	11
2.2.1 Allgemeines.....	11
2.2.2 Definition Flexibilität.....	11
2.2.3 Arten der Flexibilität.....	12
2.3 Produktionsplanung und -steuerung.....	13
2.3.1 Allgemeines.....	13
2.3.2 Produktionsplanung.....	15
2.3.3 Produktionssteuerung.....	17
2.3.4 Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung.....	17
2.3.5 Datenverwaltung in der Produktionsplanung und -steuerung.....	21
2.3.6 Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung.....	23
2.4 Daten- und Informationsmanagement in der auftragsbezogenen Produktion.	24
2.4.1 Allgemeines.....	24
2.4.2 Betriebsdatenerfassung	25
2.4.3 Informations- und Kommunikationstechnik	26
2.5 Kennzahlen und Kennzahlensysteme	28

2.6	Technische Wissensverarbeitung.....	29
2.6.1	Allgemeines.....	29
2.6.2	Wissensbasierte Systeme.....	33
2.6.2.1	Allgemeines.....	33
2.6.2.2	Architektur eines wissensbasierten Systems.....	34
2.6.2.3	Wissensrepräsentation.....	36
2.6.3	Knowledge Discovery in Databases.....	39
2.7	Zusammenfassung und Fazit.....	42
3	Stand der Forschung und Technik.....	43
3.1	Übersicht.....	43
3.2	Ansätze zur Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten.....	43
3.3	Ansätze zur Steigerung der Stammdatenqualität.....	47
3.4	Ansätze zur Optimierung der Maschinenbelegung.....	50
3.5	Fazit und resultierender Handlungsbedarf.....	53
4	Übersicht über das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung.....	57
5	Aufnahme und Verarbeitung produktspezifischer Auftragsdaten.....	61
5.1	Übersicht.....	61
5.2	Datenmodell für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung.....	62
5.2.1	Allgemeines.....	62
5.2.2	Graphenbasierte Modellierung von Arbeitsvorgangfolgen.....	63
5.2.3	Auftragsmodell.....	66
5.2.4	Ressourcenmodell.....	69
5.2.5	Produktionsmodell.....	71
5.3	Aufnahme produktspezifischer Auftragsdaten.....	73
5.3.1	Allgemeines.....	73
5.3.2	Systemelemente des Offline-Betriebsdatenerfassungssystems.....	73
5.3.3	Funktionen des Offline-Betriebsdatenerfassungssystems.....	75
5.3.3.1	Übersicht.....	75
5.3.3.2	Funktion Erfassung Auftragsdaten.....	75

5.3.3.3 Funktion Bewertung Produktionszustand.....	80
5.4 Analyse produktspezifischer Auftragsdaten.....	85
5.4.1 Allgemeines.....	85
5.4.2 Funktionen des Auftragsdaten-Analysesystems	86
5.4.2.1 Übersicht.....	86
5.4.2.2 Funktion Bereitstellung Stammdaten	87
5.4.2.3 Funktion Ableitung Produktionswissen.....	93
5.5 Zusammenfassung und Fazit	106
6 Wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung	109
6.1 Übersicht.....	109
6.2 Systemelemente der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	109
6.3 Ablauf der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	112
6.4 Funktionen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	114
6.4.1 Übersicht	114
6.4.2 Funktion Planung Maschinenbelegung.....	114
6.4.3 Funktion Prädiktion Produktionszustand	118
6.4.4 Funktion Adaption Durchlaufzeit-Anteil.....	119
6.5 Zusammenfassung und Fazit	126
7 Umsetzung und Bewertung.....	127
7.1 Übersicht.....	127
7.2 Prototypische Umsetzung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	127
7.2.1 Systemübersicht des Hard- und Software-Demonstrators	127
7.2.2 Produktionstechnische Versuchsanlage	129
7.2.3 Simulationsmodell der produktionstechnischen Versuchsanlage	130
7.3 Anwendung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung	132
7.3.1 Allgemeines.....	132
7.3.2 Modellierungsphase	132
7.3.3 Anwendungsphase.....	136
7.3.3.1 Allgemeines	136

7.3.3.2	Offline-Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten	136
7.3.3.3	Generierung der dynamischen Stammdaten	138
7.3.3.4	Generierung des Produktionswissens.....	140
7.3.3.5	Wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung	143
7.4	Simulationstechnische Validierung	151
7.5	Bewertung	153
7.5.1	Allgemeine Bewertung	153
7.5.2	Wirtschaftliche Bewertung.....	155
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	157
9	Literatur	161
10	Anhang	189
10.1	Verzeichnis betreuter Studienarbeiten	189
10.2	Verwendete Softwareprodukte.....	190

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
Auto-ID	Automatische Identifikation
AVO	Arbeitsvorgang
B	Bearbeitungsvorgang
BAZ	Bearbeitungszeit
BDE	Betriebsdatenerfassung
BLZ	Belegungszeit
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
CPPS	Cyber-Physische Produktionssysteme
DGIQ	Deutsche Gesellschaft für Informations- und Datenqualität e. V.
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLZ	Durchlaufzeit
EN	Europäische Norm
EPC	Electronic Product Code
EPCIS	Electronic Product Code Information Service
ERP	Enterprise Resource Planning
FLT	Frühester Liefertermin
ggf.	gegebenenfalls
GS1	Global Standard One

GUI	Graphical User Interface
H	Hauptbearbeitungszeit
HNZ	Hauptnutzungszeit
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IQ	Informationsqualität
ISO	International Organization for Standardization
JIS	Just-in-Sequence
JIT	Just-in-Time
KDD	Knowledge Discovery in Databases
KI	Künstliche Intelligenz
KNN	k-nächste Nachbarn
KPI	Key Performance Indicators (dt. Kennzahlen)
L	Liegevorgang
LZ	Liegezeit
MES	Manufacturing Execution System
N	Nebenbearbeitungszeit
OCR	Optical Character Recognition
OEE	Overall Equipment Effectiveness
PBZ	Planbelegungszeit
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
R	Rüstvorgang
REFA	Verband für Arbeitsgestaltung, Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung

RFID	Radio-Frequency Identification
RuleML	Rule Markup Language
SAHN	Sequentielle agglomerative hierarchische nichtüberlappende Clusteranalyse
SFB	Sonderforschungsbereich
sog.	sogenannte
SU	störungsbedingte Unterbrechungen
SZ	Stillstandszeit
T	Transportvorgang
TBE	Bearbeitungsende
TBEV	Bearbeitungsende Vorgänger
TRA	Rüstanfang
TRZ	tatsächliche Rüstzeit
TZ	Transportzeit
u. a.	unter anderem
UML	Unified Modeling Language
usw.	und so weiter
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V.
vgl.	vergleiche
WB	Komponente der Wissensbasis
WBS	Wissensbasiertes System

WBS-DLZ	Wissensbasiertes System zur Adaption von Durchlaufzeit-Anteilen
WV	Komponente der Wissensverarbeitung
XML	eXtensible Markup Language
z. B.	zum Beispiel
ZDF	Durchführungszeit
ZUE	Übergangszeit

Verzeichnis der Formelzeichen

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	Stk./h	Ausbringung
a_i	-	i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut
$a_{P,i}$	-	i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut des Planungsfalls f_P
$a_{F_j,i}$	-	i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut des j -ten DLZ-Anteil-Falls f_{F_j}
$a_{P,N,i}$	-	normiertes i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut des Planungsfalls f_P
$a_{F_j,N,i}$	-	normiertes i -tes produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibendes Attribut des j -ten DLZ-Anteil-Falls f_{F_j}
$a_{max,i}$	-	Maximalwert aller DLZ-Anteil-Fälle für das i -te produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibende Attribut
$AVO_{eingeplant}$	-	Menge eingeplanter AVOs
$AVO_{einplanbar}$	-	Menge einplanbarer AVOs
$AVO_{einzuplanen}$	-	Menge einzuplanender AVOs
$AVO_{nicht_einplanbar}$	-	Menge nicht einplanbarer AVOs
BG	%	Beleggrad
BNG	%	Belegnutzgrad
BZ	h	Belegungszeit

Verzeichnis der Formelzeichen

C_i	-	i -tes Abweichungscluster
D	Stk./h	Durchsatz
DLZ	h	Durchlaufzeit
e	-	Fehlertoleranz
E	%	Effektivität
f_P	-	Planungsfall
f_F	-	DLZ-Anteil-Fall
$f_{F_adaptiert}$	-	adaptierter ähnlichster DLZ-Anteil-Fall
$G_j(Z)$	-	Informationsgewinn durch das j -te Attribut aus der Menge Z an betrachtetem Knoten
GLZ	h	Gesamtliegezeit
GRZ	h	Gesamtrüstzeit
GSZ	h	Gesamtstillstandszeit
GTZ	h	Gesamttransportzeit
$H(Z)$	-	Information in Menge Z
HNZ	h	Hauptnutzungszeit
k	-	Abweichungsclusterbreite
$k_{\text{Ähnlichkeit}}$	%	ausreichender Übereinstimmungsgrad zwischen Planungs- und Fallbasisfall
k_{max}	-	maximale Abweichungsclusterbreite
$k_{min_Ähnlichkeit}$	%	minimal erforderlicher Übereinstimmungsgrad zwischen Planungs- und Fallbasisfall
LG	%	Liegegrad
μ	-	Erwartungswert

$\mu_{DLZ\text{-Anteil}}$		Erwartungswert des spezifischen DLZ-Anteils
NG	%	Nutzgrad
$n_{min_erforderlich}$	Stk.	Anzahl erforderlicher DLZ-Anteile
$n_{vorhanden}$	Stk.	Anzahl vorhandener DLZ-Anteile in Bewertungsintervall
p	-	Wahrscheinlichkeitswert
$P(t)$	-	Dichtefunktion der Wahrscheinlichkeitsverteilung der DLZ-Anteil Durchführungsdauer
PBZ	h	Planbelegungszeit
PG	%	Prozessgrad
φ	h	Bewertungsintervall
RG	%	Rüstgrad
$sim_{DLZ\text{-Anteil}}$	-	DLZ-Anteil-Ähnlichkeit
SG	%	Stillstandsgrad
SGA	%	Sicherheitsgrad des Auftrags
SGM	%	Sicherheitsgrad der Maschine
σ	-	Standardabweichung
σ_{max}	-	maximal akzeptable Streuung des DLZ-Anteils
T	-	Zufallsvariable
$t_{DLZ\text{-Anteil}}$	min	Durchführungszeit des spezifischen DLZ-Anteils
t_G	min	Grundzeit des DLZ-Anteils
t_{min}	min	minimale Durchführungszeit des DLZ-Anteils

Verzeichnis der Formelzeichen

t_{max}	min	maximale Durchführungszeit des DLZ-Anteils
t_p	min	Planzeit des DLZ-Anteils bei Wahrscheinlichkeitswert p
Δt_S	min	Sicherheitszuschlag des DLZ-Anteils
$t_{signifikanz}$	-	Signifikanzniveau
τ	-	Abweichungsverhältnis der Dauer des spezifischen DLZ-Anteils
V	%	Verfügbarkeit
$V(T)$	-	Varianz
w_i	-	spezifischer Gewichtungsfaktor des i -ten Attributes
WS	Stk.	Warteschlange

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Das produzierende und im Speziellen das verarbeitende Gewerbe sind die wichtigsten Wirtschaftsbereiche in Deutschland und bilden somit den Kern der volkswirtschaftlichen Leistungsfähigkeit (THE BOSTON CONSULTING GROUP 2006, ZÄH ET AL. 2006). So erwirtschaftete das produzierende Gewerbe im Jahr 2013 25,5 % des Bruttoinlandsproduktes der Bundesrepublik (STATISTISCHES BUNDESAMT 2014). Zu den ca. 7,7 Millionen direkt Beschäftigten in diesem Bereich kommen noch ca. 7 Millionen im angrenzenden Dienstleistungssektor sowie etwa in gleicher Anzahl induzierte Beschäftigte hinzu (MCKINSEY & COMPANY 2009). Somit sind über die Hälfte der Arbeitsplätze in Deutschland direkt oder indirekt von der Produktion abhängig. Mit einer Exportquote von ca. 76,7 % im Jahr 2013 der Waren im Bereich des Maschinenbaus unterstreicht Deutschland zudem seine Stärke auf dem Weltmarkt in der Produktionstechnik (STATISTA 2014). Auch im internationalen Vergleich wird deutlich, dass keine andere westliche Industrienation so stark auf die Produktion ausgerichtet ist wie Deutschland (UN DATA 2012).

Mit dem Ziel, die skizzierte Stellung auch an einem Hochlohnstandort wie Deutschland in Zukunft innezuhaben, sind Unternehmen im produzierenden Gewerbe heutzutage mehr denn je besonderen Herausforderungen ausgesetzt. Diese sind u. a. Globalisierung, Dynamisierung der Produktlebenszyklen, Durchdringung mit neuen Technologien, Ressourcenverknappung, Risiko der Instabilität und demografischer Wandel (ABELE & REINHART 2011). Des Weiteren konnte ein kontinuierlicher Anstieg des Anspruchsniveaus der Kunden beobachtet werden (LINDEMANN ET AL. 2006). Dies hat u. a. zu einer deutlichen Steigerung der Variantenzahlen bei sinkendem Mengenvolumen, verkürzten Lieferzeiten, intransparenten Entwicklungs- und Herstellungskosten sowie einer höheren Anfälligkeit der Produkte und Produktionsprozesse gegenüber äußeren Einflüssen (z. B. Nachfrageschwankungen, technische Änderungen) geführt (WESTKÄMPER 2003, LINDEMANN ET AL. 2006, WILDEMANN 2012). Folglich ist das Unternehmensumfeld aufgrund seiner dynamischen Natur und der vielen Einflussgrößen hochkomplex und kann als turbulent bezeichnet werden (WARNECKE 1996, CALANTONE ET AL. 2003, WIENDAHL 2006) und erschwert zunehmend die Erstellung verlässlicher Produktionsprogramme (LÖDDING 2008).

Die Konkurrenzfähigkeit deutscher Betriebe ist infolge der Studie *Untersuchung über die Zukunft der Produktion in Deutschland* des Fraunhofer-Instituts für System- und Innovationsforschung ISI maßgeblich auf die Fähigkeit, „mit technologisch führenden Produkten und einer flexiblen und leistungsfähigen Produktion kundenspezifische Produkte höchster Qualität herstellen zu können“ (SCHIRRMESTER ET AL. 2003, S. 72), zurückzuführen. Die Erfüllung der Kundenwünsche beinhaltet aber zudem einen Anstieg der hierfür erforderlichen variantenspezifischen Komponenten und hat eine Reduzierung von standardisierten Bauteilen zur Folge (ADAM 1998). Mit der steigenden Produktkomplexität (BIENIEK 2001) findet ebenfalls ein Wandel von standardisierten zu individualisierten Produktionsabläufen statt (WIENDAHL 2002) und führt zu neuen Produkterstellungsprozessen und damit auch zu veränderten Anforderungen an die Fabrik (GÜNTNER ET AL. 2006). Somit bestehen im Bereich der Produktion erhöhte Anforderungen an die Flexibilität (REINHART & HABICHT 2001). Für die Fertigung und Montage bedingt dies Produktionssysteme, die eine schnelle und effiziente strukturelle Anpassung der Produktion ermöglichen (BROWNE ET AL. 1984, SETHI & SETHI 1990, WIENDAHL ET AL. 2007, NYHUIS ET AL. 2008). Die Anpassungsfähigkeit an sich ständig wandelnde Anforderungen ist nach WESTKÄMPER (2003) somit ein Maß des wirtschaftlichen Erfolges sowie der Wettbewerbsfähigkeit von produzierenden Unternehmen.

1.2 Problembeschreibung

Auf Basis der zuvor dargestellten Rahmenbedingungen führt das zu der Forderung, durch eine adäquate Planung und Steuerung und den Einsatz angemessener Technologien, eine Flexibilität der gesamten Produktion zu realisieren (KLEINE ET AL. 2007). Die Flexibilität in der Produktion ist demnach neben der Produktqualität das wichtigste Differenzierungskriterium kleiner und mittelständischer Unternehmen, um sich von Wettbewerbern abzuheben und gleichzeitig Kostennachteile zu kompensieren (SEIDEL & GARREL 2011). Im Speziellen umfasst dies die Flexibilität hinsichtlich Varianten, Mengen und Produkten, welche am wirtschaftlichsten durch den Organisationstyp der Werkstattfertigung¹ (Verrichtungsprinzip) realisiert werden kann (BRINZER 2005, KLUßMANN 2009). Bedingt

¹ Die Werkstattfertigung ist nach dem VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (1992, S. 184) als „stufenweise Fertigung von Material oder Erzeugnissen in räumlich zusammenhängenden und entsprechend der Arbeitsaufgabe angeordneten ortsgebundenen Arbeitsplätzen eines Teilbereichs bei vorgegebener Artenteilung und unter Einsatz von verschiedenen Arbeitskräften, die während der Arbeitsausführung die Arbeitsplätze wechseln“ definiert.

durch die hohe verfügbare Flexibilität weist dieser Organisationstyp allerdings eine geringere Produktivität als bei hohen Beständen und langen Durchlaufzeiten (DLZ) auf (ADAM 1998). Bezogen auf den Durchschnitt des verarbeitenden Gewerbes liegt diese nach LAY ET AL. (2009) bei der Einzel- und Kleinserienfertigung bei -5,1 % (vgl. Großserienfertigung 5,0 %) sowie bei der Kundenauftragsfertigung bei -3,6 % (vgl. Produktion auf Lager 17,0 %). Die Kompensation dieser Nachteile durch eine effiziente Abwicklung von Produktionsaufträgen stellt folglich die größte Herausforderung dar, um in der Einzel- oder Kleinserienfertigung kundenindividuelle Produkte in einem turbulenten Marktumfeld termingerecht und zu vertretbaren Kosten zu produzieren.

Zur Beherrschung der beschriebenen kundeninduzierten Komplexität, lassen sich nach WIENDAHL (2006) zwei Grundphilosophien ableiten, die in einer hohen Liefertreue resultieren. Erstens bedarf es einer *differenzierteren Planung*, die eine höhere Aussagekraft aufweist und somit zu realistischen Lieferterminen führt. Zweitens ist eine *reaktionsschnellere Steuerung* erforderlich, um die Erfüllung der zugesagten Liefertermine trotz unerwarteter Vorfälle im Produktionsprozess sicherzustellen. Demgegenüber stehen die von SCHUH & WESTKÄMPER (2006) in der Studie *Liefertreue im Maschinen- und Anlagenbau* identifizierten wesentlichen Stolpersteine in der Lieferterminermittlung wie auch -erfüllung (vgl. Abbildung 1). Unter den 80 befragten Unternehmen, die hauptsächlich aus dem Maschinen- und Anlagenbau stammen, wurden ungenügende Stamm- und Rückmeldedaten sowie eine inkonsistente Auftragssteuerung als wesentliche Hemmnisse genannt.

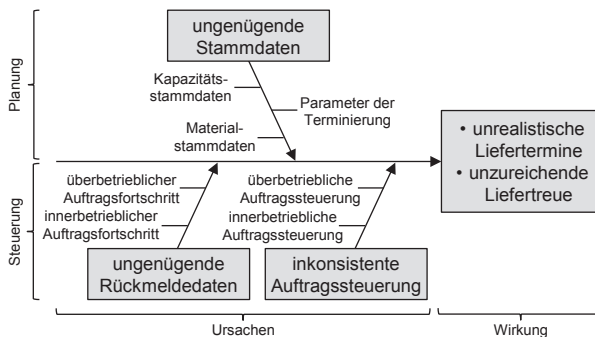


Abbildung 1: Stolpersteine in der Lieferterminermittlung und -erfüllung (nach SCHUH & WESTKÄMPER 2006)

Gerade die hohe Volatilität in der auftragsbezogenen Produktion in Verbindung mit darauf nicht angepassten Stammdaten² (Kapazitäts- und Materialstammdaten sowie Parameter der Terminierung) führt zwangsläufig zu unrealistischen Produktionsplänen und damit zu unrealistischen Lieferterminen. Nach KURBEL (2005) liegt ein Grund darin, dass Durchschnitts- oder Erfahrungswerte zur Planung herangezogen werden. Diese berücksichtigen jedoch nicht, dass die Durchführung der Produktionsaufträge von vielen Faktoren (z. B. Kapazitätsbelastung zum Zeitpunkt der Auftragsfreigabe, Bearbeitungsreihenfolgen an den einzelnen Betriebsmitteln) beeinflusst wird und somit eine unsichere Planungsgrundlage darstellt (KLETTI 2006). Des Weiteren haben z. B. Inkonsistenzen zwischen Terminierungsparametern und der Realität (z. B. Plan-Durchlaufzeit 10 Stunden; Ist-Durchlaufzeit 14 Stunden) wie auch zu hoch angenommene Kapazitäten zu frühe, nicht einhaltbare Liefertermine zur Folge. Gründe für die fehlende Aktualität der Stammdaten sind mangelnde Pflegehäufigkeit, keine definierte Verantwortlichkeit und eine fehlende softwaretechnische Unterstützung zur regelmäßigen Stammdatenüberprüfung. So gaben nur 28 % der befragten Unternehmen an eine regelmäßige, 47 % eine unregelmäßige und 21 % keine Aktualisierung der Terminierungsparameter durchzuführen (SCHUH & WESTKÄMPER 2006). Zum Controlling der Stammdaten werden vornehmlich Rückmeldedaten aus der Produktionsebene verwendet (KURBEL 2005). Die daraus ableitbare Forderung an die hierfür notwendige hohe Datenqualität stellt Unternehmen heutzutage allerdings noch vor große Schwierigkeiten (LÜSSEM 2011). Dies wird vor dem Hintergrund deutlich, dass nur etwa die Hälfte der befragten Unternehmen überhaupt Systeme zur Betriebsdatenerfassung (BDE) verwenden. Untersuchungen von BECKERT & HUDETZ (2002) belegen zudem, dass ca. 60 % der eingesetzten BDE-Systeme als reine Insellösungen für statistische Auswertungen betrieben werden. Eine direkte Verwendung der Betriebsdaten für Planungs- und Steuerungstätigkeiten findet demnach nur selten statt. Aktuell werden etwa 7 % der erfassten Daten für die Steuerung von Unternehmensabläufen eingesetzt (BERNARD 2011). Des Weiteren verhindert ein falsch eingestelltes Rückmelde-raster überdies eine rechtzeitige Reaktion auf unvorhergesehene Situationen (SCHUH & WESTKÄMPER 2006).

² Stammdaten sind nach ISO/TS 8000-1:2011 „Daten einer Organisation, welche Entitäten beschreiben die gleichzeitig unabhängig und fundamental für diese Organisation sind und die referenziert werden müssen, um Transaktionen durchzuführen“.

Gerade bei der Maschinenbelegungsplanung, die die Reihenfolge der durchzuführenden Arbeitsvorgänge der Produktionsaufträge auf eine oder mehrere Betriebsmittel festlegt, ergeben sich durch die steigende Anzahl individualisierter Produkte auch zwangsläufig zu berücksichtigende individualisierte Abläufe (WIENDAHL 2002, KURBEL 2005). Dies betrifft vornehmlich die DLZ-Anteile (Bearbeitungs-, Rüst-, Transport- und Liegezeit), welche zum einen von der Arbeitsaufgabe selbst und zum anderen von den Umständen (z. B. Effektivität), unter denen die Arbeitsaufgabe durchgeführt wird, abhängen (REINHART & GEIGER 2011). Erschwerend kommt hinzu, dass bei der Verwendung von Stammdaten zur Maschinenbelegung, die auf Betriebsdaten aus der Vergangenheit basieren, diese nur Gültigkeit haben, wenn sich die Bedingungen in der Produktion (z. B. Kapazitätsauslastung) nicht verändert haben (NYHUIS & WIENDAHL 2003). Folglich ist in der auftragsbezogenen Produktion die Berücksichtigung des Produktionszustandes bei der Maschinenbelegungsplanung essentiell und erfordert somit eine kontextsensitive Bereitstellung der Stammdaten. Allerdings ist eine zufriedenstellende Lösung der gerade beschriebenen Herausforderungen durch den Einsatz konventioneller Planungs- und Steuerungsmethoden in den meisten Fällen nicht möglich. Bestehende Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung (PPS) und die darin enthaltenden Algorithmen sind zu starr und werden der vom Markt induzierten Dynamik nicht gerecht (SCHOLZ-REITER ET AL. 2008). Demnach lässt sich die Forderung nach lernfähigen PPS-Systemen formulieren, welche die Fähigkeit aufweisen, sich kontinuierlich an veränderte Bedingungen anzupassen. Es wird deutlich, dass das *Lernen* der technischen Systeme, der Organisationen sowie der Mitarbeiter ein entscheidender Erfolgsfaktor ist und dies die schnelle Adaption zum einen an dynamische Märkte und zum anderen an interne Produkt- und Prozessinnovationen ermöglicht (SAVAGE 1996).

1.3 Zielstellung der Arbeit

Wie im vorherigen Abschnitt erläutert, determiniert die Maschinenbelegungsplanung wesentlich die Erfüllung von Lieferterminen und somit auch den wirtschaftlichen Erfolg von produzierenden Unternehmen. Daraus ergibt sich als übergeordnetes Ziel dieser Arbeit ein System zu entwickeln, welches umsetzbare Maschinenbelegungspläne erzeugt und damit zu einem hohen Lieferterminerfüllungsgrad führt. Hierzu sind im Prozess der Maschinenbelegungsplanung der zu erwartende Zustand in der Produktion, unter dem die einzelnen Arbeitsvorgänge durchgeführt werden, wie auch auftragsfolgebezogene Abhängigkeiten zu berücksichtigen und Terminierungsparameter entsprechend zu wählen bzw. bereit-

zustellen. Zur Realisierung der beschriebenen Zielsetzung sind die folgenden Teilziele umzusetzen:

- *Durchgängig einsetzbares Datenmodell:*
Das zu entwickelnde System muss die Fähigkeit aufweisen, sich selbstständig an wandelnde Bedingungen in der Produktionsebene anzupassen. Dies erfordert ein Datenmodell, welches von der Planung der Maschinenbelegung über die Datenaufnahme im Produktionsprozess bis hin zur Datenanalyse und Ableitung des Produktionswissens eingesetzt werden kann. Dies setzt die strukturierte Verwaltung der Daten als auch die Erweiterbarkeit des Datenmodells voraus.
- *Produktbasierte Aufnahme von Auftragsdaten und Ableitung von Wissen:*
Durch die Verwendung von intelligenten Produkten (vgl. Abschnitt 2.4) ist eine automatisierte, skalierbare Betriebsdatenerfassung zu realisieren. Mit ihrer Hilfe sollen während des Produktionsprozesses alle relevanten Daten aufgenommen und durch eine anschließende Verarbeitung zu einem vollständigen Wissen (u. a. Produktionszustand je DLZ-Anteil) über die Produkterstellung führen. Hierbei sind sowohl die Bereitstellung von Stammdaten als auch die Identifikation von impliziten Zusammenhängen zu betrachten.
- *Algorithmus zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung:*
Es ist ein Algorithmus erforderlich, welcher unter Berücksichtigung des zu erwartenden Produktionszustandes und weiterer impliziter Zusammenhänge einen qualitativ hochwertigen Maschinenbelegungsplan mit einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit erzeugt. Hierbei ist es zudem entscheidend, die in den Terminierungsparametern enthaltenen Unsicherheiten in einer geeigneten Form zu berücksichtigen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf die genannten Teilziele sowie deren Zusammenführung zu einem Gesamtsystem gelegt. Der Bereich der Produktionssteuerung und der damit verbundenen Entwicklung von Steuerungsprinzipien wird hierbei nicht betrachtet. Es soll vielmehr die Möglichkeit vorgeesehen werden, bekannte Ansätze in das PPS-System zu integrieren und durch eine qualitativ hochwertigere Stammdatenbasis bessere Planungsergebnisse zu realisieren. Somit ist der Betrachtungsbereich der vorliegenden Arbeit auf die Betriebsdatenerfassung, die Datenaufbereitung und -analyse, die Stammdaten-Bereitstellung sowie die Maschinenbelegungsplanung begrenzt. Die vor- und

nachgelagerten Bereiche werden nicht betrachtet. Die von der Arbeitsvorbereitung erstellten Arbeitspläne sowie das zu produzierende Produktionsprogramm und die dafür notwendigen Betriebsmittel werden als gegeben angesehen. Die Disposition von Material und Hilfsstoffen wird in diesem Kontext nicht betrachtet und durch die Grobterminierung innerhalb des Enterprise Resource Planning (ERP) Systems als bereits erfüllt angesehen. Des Weiteren liegt eine Begrenzung auf innerbetriebliche Prozesse vor.

Der Nachweis der Praxistauglichkeit erfolgt durch die Umsetzung des Gesamtsystems in einem Software-Prototyp (vgl. Kapitel 7). Dessen Validierung findet sowohl an einer produktionstechnischen Versuchsanlage wie auch einem erweiterten Simulationsmodell der Versuchsanlage statt.

1.4 Aufbau der Arbeit

In den vorangegangenen Abschnitten wurden sowohl die Ausgangssituation als auch die zugrundeliegende Problemstellung dargelegt. Zur Erreichung der sich daraus ergebenden Zielstellung (vgl. Abschnitt 1.3), gliedert sich die vorliegende Arbeit, inklusive der Einleitung und der Zusammenfassung, in acht inhaltliche Kapitel (vgl. Abbildung 2).

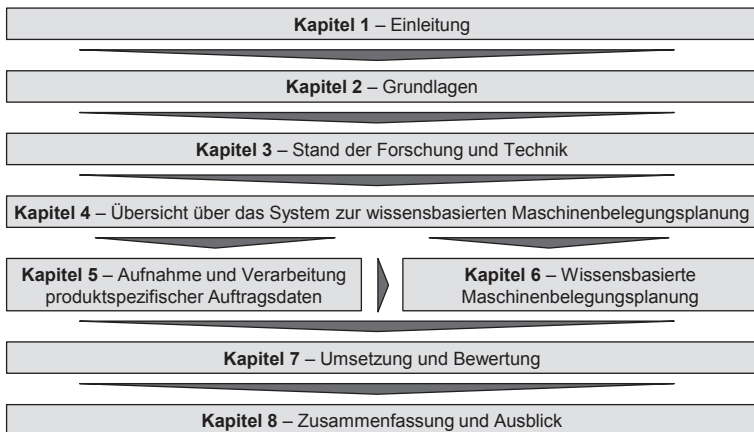


Abbildung 2: Aufbau der Arbeit

Hierzu werden in *Kapitel 2* die notwendigen Grundlagen im Bereich der Flexibilität in der Produktion, der Produktionsplanung und -steuerung, der Kennzahlen

und Kennzahlensysteme wie auch des Daten- und Informationsmanagements in der auftragsbezogenen Produktion gelegt. Des Weiteren wird die technische Verarbeitung und Repräsentation von Wissen betrachtet. Hierbei wird im Speziellen auf wissensbasierte Systeme als auch auf die Wissensextraktion in Datenbanken, das sog. Knowledge Discovery in Databases (KDD), eingegangen.

Der daraus identifizierte relevante Stand der Forschung und Technik wird in *Kapitel 3* betrachtet und umfasst im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit die Diskussion von Ansätzen in drei Bereichen. Hierbei handelt es sich um die Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten, die Steigerung der Stammdatenqualität sowie die Optimierung der Maschinenbelegung. Abgeschlossen wird das Kapitel durch die Ableitung des sich ergebenden Handlungsbedarfs, welcher gleichzeitig die Grundlage für das zu entwickelnde System darstellt.

In Kapitel 4 wird eine Übersicht über das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung gegeben. Hierbei werden die einzelnen Elemente und ihre Beziehungen zueinander beschrieben. Diese sind die produktspezifischen Auftragsdaten, das Offline-Betriebsdatenerfassungssystem, das Auftragsdaten-Analysesystem und das wissensbasierte Planungssystem.

Aufbauend auf den Anforderungen sowie der Ergebnisse aus der Diskussion des Standes der Forschung und Technik wird in den Kapiteln 5 und 6 das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten entwickelt. In *Kapitel 5* erfolgt die Beschreibung der Haltung, Aufnahme und Verarbeitung der produktspezifischen Auftragsdaten, welche in den Kontext des KDD-Prozesses gesetzt werden. Dabei findet ein Datenmodell Verwendung, welches eine durchgängige Haltung der Daten innerhalb des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung ermöglicht, das aus den Teilmodellen Auftragsmodell, Ressourcenmodell und Produktionsmodell besteht. Des Weiteren wird zur Aufnahme der produktspezifischen Auftragsdaten ein Ansatz zur produktbasierten Offline-Betriebsdatenerfassung vorgestellt, wobei ein Kennzahlensystem zur Beschreibung des Produktionszustandes verwendet wird. Die auf diese Art erfassten Daten dienen als Grundlage zur Analyse und der damit einhergehenden Bereitstellung von dynamischen Stammdaten sowie der Ableitung des fall- und regelbasierten Produktionswissens.

Der strukturelle Aufbau sowie die Funktionsweise der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung werden in *Kapitel 6* behandelt. Dabei erfüllt sie die Aufga-

be, die Maschinenbelegung entsprechend des zu erwartenden Produktionszustandes mit Hilfe des zuvor erworbenen Produktionswissens festzulegen und damit die Qualität des Planungsergebnisses zu erhöhen. Dies wird durch den Einsatz einer dynamischen Stammdatenbasis wie auch eines wissensbasierten Systems zur Adaption der Dauer von Durchlaufzeit-Anteilen erreicht.

In *Kapitel 7* wird die prototypische Umsetzung des entwickelten Systems in einem Hard- und Software-Demonstrator dargestellt. Dies beinhaltet die Beschreibung sowohl der produktionstechnischen Versuchsanlage als auch das darauf basierende Simulationsmodell, welche zur Validierung des entwickelten Systems herangezogen wurden. Des Weiteren erfolgt eine kritische Bewertung des in den Kapiteln 5 und 6 beschriebenen Systems.

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt zum Abschluss der Arbeit in *Kapitel 8*. Darauf aufbauend wird zudem ein Ausblick für weiteren Forschungsbedarf im Bereich der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung formuliert.

2 Grundlagen

2.1 Übersicht

Aufbauend auf der dargelegten Ausgangssituation und Problemstellung werden in diesem Kapitel die Grundlagen der *Flexibilität in der Produktion* (vgl. Abschnitt 2.2) wie auch die der *Produktionsplanung und -steuerung* (vgl. Abschnitt 2.3) erläutert und in den Kontext der vorliegenden Arbeit eingeordnet. Des Weiteren werden vor dem Hintergrund der Zielsetzung dieser Arbeit das *Daten- und Informationsmanagement in der auftragsbezogenen Produktion* (vgl. Abschnitt 2.4), *Kennzahlen und Kennzahlensysteme* (vgl. Abschnitt 2.5) sowie die *technische Wissensverarbeitung* (vgl. Abschnitt 2.6) betrachtet.

2.2 Flexibilität in der Produktion

2.2.1 Allgemeines

In der Ausgangssituation wurde die Flexibilität von Unternehmen neben der Produktqualität bereits als wichtigstes Differenzierungsmerkmal identifiziert. Zur Eingrenzung des Flexibilitätsbegriffes wird dieser in einem ersten Schritt aus der Sicht der Produktion definiert (vgl. Abschnitt 2.2.2) und im Weiteren werden unterschiedliche Ausprägungen der Flexibilität (Abschnitt 2.2.3) dargestellt.

2.2.2 Definition Flexibilität

Allgemein ist unter dem Begriff Flexibilität die Fähigkeit zu verstehen, sich an verändernde Umstände anzupassen (BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT GMBH 2010). KALUZA & BLECKER (2004, S. 9) beschreiben „*Flexibilität als die Eigenschaft eines Systems proaktive oder reaktive sowie zielgerichtete Änderungen der Systemkonfiguration zu ermöglichen, um die Anforderungen von sich verändernden Umweltbedingungen zu erfüllen*“. Im Hinblick auf Unternehmen beschreiben ABELE & REINHART (2011, S. 19) Flexibilität als die „*Fähigkeit sich vorhersehbarer Veränderungen der Unternehmensumwelt möglichst kostengünstig anzupassen*“. DE TONI & TONCHIA (1998) erweitern diese Definition noch um die Aspekte, dies mit einem geringen Zeit- und Leistungseinsatz durchzuführen. Bezogen auf die Produktion wird nach WESTKÄMPER (2006, S. 66) Flexibilität als „*die Geschwindigkeit und der Aufwand zur Umstellung einer Produktion be-*

zeichnet. Dieser Aufwand ist in der Fertigung an den Umrüstungen der Maschinen und Anlagen messbar“. Diese Definition wird auch in der vorliegenden Arbeit verwendet und zudem um die zeitliche und (informations-) technische Betrachtung der Umrüstungen in den verwendeten PPS-Systemen erweitert.

2.2.3 Arten der Flexibilität

In der Literatur finden sich unterschiedliche Klassifikationen der produktionswirtschaftlichen Flexibilität (u. a. SETHI & SETHI 1990, GERWIN 1993, SOUZA & WILLIAMS 2000). Aufgrund der wegweisenden Rolle des Beitrages von SETHI & SETHI (1990) wird dieser stellvertretend im Folgenden genauer betrachtet. Hierbei erfolgt eine Unterteilung der Flexibilität in elf Flexibilitätsarten, welche in eine hierarchische Drei-Ebenen-Struktur eingebettet sind (vgl. Abbildung 3).

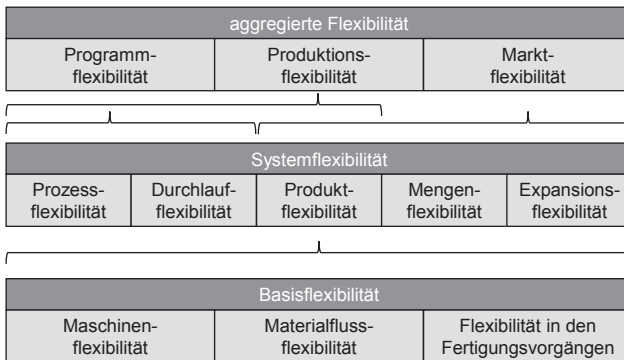


Abbildung 3: Arten der Flexibilität (nach SETHI & SETHI 1990)

Die Ebene der *Basisflexibilität* stellt dabei die Grundlage für die beiden höheren Ebenen dar und beinhaltet drei Flexibilitätsarten. Die *Maschinenflexibilität* nimmt Bezug auf die verschiedenen Arbeitsgänge, die von einer Maschine durchgeführt werden können. Die *Materialflussflexibilität* bezieht sich auf die Bereitstellung der zur Bearbeitung notwendigen Teile. Die *Flexibilität in den Fertigungsvorgängen* beschreibt die Fähigkeit, Teile auf unterschiedliche Arten herzustellen (MÖSLEIN-TRÖPPNER 2010).

Die Ebene der *Systemflexibilität* beinhaltet die Prozess-, Durchlauf-, Produkt-, Mengen- und Expansionsflexibilität. Das zentrale Element stellt hier die *Produktflexibilität* dar, da sie die Fähigkeit des gesamten Produktionssystems be-

schreibt. Die *Prozessflexibilität* beschreibt die Produkte, welche ohne eine Veränderung des Systems hergestellt werden können. Dahingegen gibt die *Durchlauflexibilität* die Fähigkeit an, auf unterschiedliche Arten ein Produkt herzustellen. Die *Mengenflexibilität* bezieht sich auf die Realisierung unterschiedlicher Output-Mengen. Die *Expansionsflexibilität* stellt darüber hinaus die Fähigkeit des Systems zur Weiterentwicklung dar und dient damit der Erhöhung der Mengenflexibilität (MÖSLEIN-TRÖPPNER 2010).

Auf der Ebene der *aggregierten Flexibilität* setzen sich die zugehörigen Flexibilitätsarten nur aus einzelnen Elementen der Systemflexibilität zusammen. So beschreibt die *Programmflexibilität* die Fähigkeit eine längere Zeit ohne Ausfälle zu funktionieren. Sie setzt die Prozess- und Durchlauflexibilität voraus. Die *Produktionsflexibilität* beinhaltet zudem noch die Produktflexibilität und beschreibt die Fähigkeit ohne größere Zusatzinvestitionen für den Produktionsprozess mehrere unterschiedliche Produkte herzustellen. Die *Marktflexibilität* besteht aus der Produkt-, Mengen- und Expansionsflexibilität und beschreibt die Eigenschaft, auf Marktveränderungen reagieren zu können (MÖSLEIN-TRÖPPNER 2010).

In der vorliegenden Arbeit werden insbesondere die Produktionsflexibilität und die darin enthaltenen Prozess-, Durchlauf- sowie Produktflexibilität aus Sicht der Maschinenbelegungsplanung detailliert betrachtet. Des Weiteren wird die Expansionsflexibilität dahingehend berücksichtigt, als dass durch das Offline-Betriebsdatenerfassungssystem wie auch das Datenmodell ein aufwandsarmes Ergänzen oder Reduzieren von Betriebsmitteln möglich ist.

2.3 Produktionsplanung und -steuerung

2.3.1 Allgemeines

Die Produktionsplanung und -steuerung unterstützt Industrieunternehmen bei der technischen Abwicklung von Aufträgen. Nach WIENDAHL (2010) erfüllt sie dabei die Aufgabe, das Produktionsprogramm nach Art und Menge in regelmäßigen Abständen im Voraus entsprechend der zur Verfügung stehenden Kapazitäten zu planen sowie dieses trotz unvermeidbarer Störungen, wie Ausschuss oder Kapazitätsausfälle, möglichst gut zu realisieren. Die beiden Teilgebiete der PPS, die Produktionsplanung und die Produktionssteuerung, lassen sich entsprechend der Definition des VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (1992, S. 167), wie sie

auch im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendet werden, abgrenzen. Somit ist „die Produktionsplanung [...] das systematische Suchen und Festlegen von Zielen für die Produktion, Vorbereiten von Produktionsaufgaben und Festlegen des Ablaufes zum Erreichen dieser Ziele“. Dahingegen ist „die Produktionssteuerung [...] das Veranlassen, Überwachen und Sichern der Durchführung von Produktionsaufgaben hinsichtlich Bedarf (Menge und Termin), Qualität, Kosten und Arbeitsbedingungen“. Nach HACKSTEIN (1989) können den beiden Teilgebieten bestimmte Hauptfunktionen zugeordnet werden (vgl. Abbildung 4).



Abbildung 4: Teilgebiete sowie Hauptfunktionen der Produktionsplanung und -steuerung (nach HACKSTEIN 1989)

Für die Produktionsplanung umfasst dies die Produktionsprogrammplanung, die Produktionsbedarfsplanung sowie die Termin- und Kapazitätsplanung (vgl. Abschnitt 2.3.2). Für die Produktionssteuerung sind dies die Auftragsfreigabe und die Auftragsüberwachung (vgl. Abschnitt 2.3.3). Die Grundlage für alle Planungs- als auch Steuerungsaktivitäten bildet die Datenverwaltung. Sie stellt somit ebenfalls eine elementare Hauptfunktion der PPS dar (vgl. Abschnitt 2.3.5).

Aufbauend auf dem PPS-Modell von HACKSTEIN (1989) wie auch dem Y-Modell von SCHEER (1995), stellt das Aachener PPS-Modell (SCHUH & STICH 2012) das derzeit bekannteste Referenzmodell dar. Darin sind die Termin- und Kapazitätsplanung, die Auftragsfreigabe sowie die Auftragsüberwachung in die Eigenfertigungs- sowie Fremdbezugsplanung und -steuerung eingeordnet.

Zur Beherrschung der hohen Komplexität in der PPS werden unterschiedliche informationstechnische Systeme je nach geforderter Aufgabe eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.3.6), um die Ziele (vgl. Abschnitt 2.3.4) bei der Auftragsabwicklung bestmöglich zu realisieren.

2.3.2 Produktionsplanung

Die Produktionsplanung beschäftigt sich mit der Planung herzustellender Produkte, den dafür notwendigen Produktionsfaktoren sowie dem eigentlichen Produktionsprozess (DOMSCHKE 1997). Sie lässt sich in die drei Hauptfunktionen Produktionsprogrammplanung, Produktionsbedarfsplanung sowie Termin- und Kapazitätsplanung unterteilen. Die *Produktionsprogrammplanung* dient der Festlegung der herzustellenden Erzeugnisse nach Art, Menge und Termin für einen definierten Planungszeitraum und erfolgt in enger Abstimmung mit der Absatzplanung. Zur Sicherstellung einer ausgeglichenen Kapazitätsauslastung wird hierbei zudem der Primärbedarf an Produkten mit den zur Verfügung stehenden Kapazitäten in der Ressourcengroßplanung abgeglichen. Das Ergebnis ist ein Produktionsplan, der verbindlich beschreibt, welche Produkte zu welchem Zeitpunkt in welcher Stückzahl hergestellt werden sollen. Die Produktionsprogrammplanung ist eine rollierende Planung, die periodisch, z. B. einmal pro Monat, für einen festgelegten Planungshorizont erfolgt. Auf Basis des zu realisierenden Produktionsprogrammes ist die Aufgabe der *Produktionsbedarfsplanung* die dafür notwendigen Ressourcen mit Hilfe von geeignet geplanten Beschaffungsprogrammen sicherzustellen. Die hierbei betrachteten Ressourcen (Produktionsfaktoren) sind u. a. Fertigungsmittel, Material (Sekundärbedarfe), Personal und Transportmittel. Unter Berücksichtigung vorliegender (Lager-) Bestände werden Bruttosekundärbedarfe an Rohstoffen, Teilen und Gruppen abgeleitet und entsprechend einer Beschaffungsart (Fremdbezug/ Eigenfertigung) zugeordnet. Die daran anschließende *Termin- und Kapazitätsplanung* hat die Aufgabe, den zeitlichen und kapazitiven Ablauf der zu fertigenden Produkte (Produktionsaufträge) zu planen. Mit Hilfe der Durchlaufterminierung werden zeitliche Zusammenhänge zwischen Produktionsaufträgen hergestellt und diese auf zur Verfügung stehende Kapazitäten verteilt. Dies erfolgt in der Maschinenbelegungsplanung, welche die Reihenfolge festlegt, in der n Produktionsaufträge (Jobs) J_i (mit $1 \leq i \leq n$) auf m Arbeitssystemen (Maschinen) M_k (mit $1 \leq k \leq m$) bearbeitet werden (ZÄPFEL & BRAUNE 2005). Ein Produktionsauftrag besteht dabei aus einer bestimmten Anzahl von Arbeitsvorgängen (AVO), welche eine technologische Reihenfolge darstellen (Reihenfolgebedingung). Jede Arbeitsstation kann zu einem Zeitpunkt nur einen Arbeitsvorgang durchführen (Kapazitätsbedingung). Bei der Belegungsplanung ist folglich sowohl die Maschinen- (technologische Folge) als auch die Auftragsfolge (organisatorische Folge) zu berücksichtigen. Das Ergebnis der Maschinenbelegungsplanung sind terminierte Aufträge, welche in einem Gantt-Diagramm (vgl. Abbildung 5) dargestellt wer-

den können (HACKSTEIN 1989, DOMSCHKE 1997, ARNOLD ET AL. 2007, SCHUH 2006, WIENDAHL 2010).

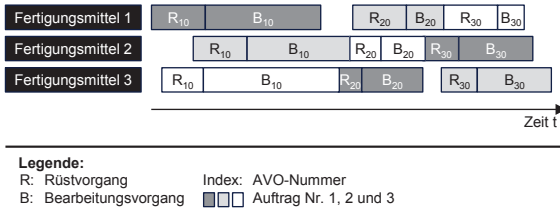


Abbildung 5: Darstellung der terminierten Aufträge in einem Gantt-Diagramm

Grundsätzlich stehen zur Planung von Produktionsabläufen optimierende und nichtoptimierende Verfahren zur Verfügung. Die optimierenden Verfahren ermitteln dabei für eine definierte Aufgabenstellung, unter Vorgabe der entsprechenden Zielgröße, die optimale Lösung. Demgegenüber wird das Auffinden einer „möglichst guten“ Lösung durch die nichtoptimierenden Verfahren realisiert. Eine Klassifizierung der Verfahren unter Nennung von spezifischen Ausprägungen ist in Abbildung 6 dargestellt.

optimierende Verfahren	nicht-optimierende Verfahren			
	konventionell		Künstliche Intelligenz (KI)	
	Prioritätsregeln	Heuristiken	Expertensysteme	sonstige KI
<ul style="list-style-type: none"> • Enumerationsverfahren • Lineare Programmierung • Dynamische Programmierung • Branch & Bound-Verfahren 	<ul style="list-style-type: none"> • First-Come-First-Served • Kürzeste/ Längste Operationszeit • Kürzeste/ Längste Restbearbeitungszeit • Frühester Liefertermin • Schlupfzeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidungstheorieansatz • Tabu-Such-Verfahren • Genetische Algorithmen • Threshold Accepting • Simulated Annealing 	<ul style="list-style-type: none"> • Regelbasierte Planungsverfahren • Monotone Inferenzkonzepte • Constraint-Direct Search • Planung mit Planungsskeletten • Opportunistische Terminierung • Planung durch Umplanung 	<ul style="list-style-type: none"> • Multi-Agenten-System • Künstliche Neuronale Netze

Abbildung 6: Klassifizierung elementarer Verfahren der Maschinenbelegungsplanung (nach SCHULZ ET AL. 1995)

Für weiterführende Informationen zu den einzelnen Verfahren sei an dieser Stelle auf einschlägige Fachliteratur (u. a. DOMSCHKE 1997, RECKER 2000, ZÄPFEL & BRAUNE 2005) verwiesen.

2.3.3 Produktionssteuerung

Die Produktionssteuerung hat die kurzfristige Durchsetzung des in der Produktionsplanung erstellten Produktionsprogrammes zur Aufgabe. Hierzu sind Anpassungen der Planvorgaben aufgrund von auftretenden Störungen und der Planungsungenauigkeit erforderlich (HACKSTEIN 1989). Sie lässt sich in die Auftragsfreigabe und die Auftragsüberwachung aufteilen. Die *Auftragsfreigabe* lässt sich nach den drei Merkmalen Kriterium (z. B. Plan-Starttermin), Detaillierungsgrad (z. B. Freigabe des gesamten Auftrages) und Auslöselogik (z. B. periodische Auftragsfreigabe) klassifizieren (ARNOLD ET AL. 2007). Hierbei wird der Zeitpunkt festgelegt, ab dem ein Auftrag bearbeitet werden darf. Zu diesem Zweck erfolgt zuerst eine Verfügbarkeitsprüfung, um sicherzustellen, dass die verplanten Ressourcen (Personal, Material, Fertigungsmittel, Werkzeuge usw.) einsetzbar sind. Dies verhindert zum einen eine Belastung der Produktion mit nicht fertigstellbaren Aufträgen und zum anderen die Nichtnutzung von bereitgestellten Kapazitäten. Eigenproduktionsaufträge werden daraufhin den jeweiligen Arbeitssystemen zugewiesen und eine Bearbeitungsreihenfolge festgelegt. Zu diesem Zweck wird jedem Auftrag in der Warteschlange eines Arbeitssystems eine Priorität nach definierten Kriterien zugeordnet. Die Bearbeitung der Aufträge erfolgt dann nach absteigender Priorität (LÖDDING 2005). Bei Erreichen des Planstarttermins erfolgen die eigentliche Freigabe des Auftrages sowie die Auslösung der Materialbereitstellung. Für Fremdaufträge resultiert die Freigabe in Form der Bestellung beim Lieferanten. Die *Auftragsüberwachung* entspricht einer Fortschrittsüberwachung der freigegebenen Aufträge. Auswertungen der Rückmeldungen erfolgen sowohl kapazitäts- wie auch auftragsbezogen. Sie basieren auf einem meist periodischen Vergleich der Plan- und Ist-Werte von Terminen und Mengen und haben zur Aufgabe, Störungen zu identifizieren und bei Bedarf entsprechende Gegenmaßnahmen (z. B. veränderte Kapazitätsplanung) einzuleiten, um die festgelegten Zielgrößen (vgl. Abschnitt 2.3.2) bestmöglich zu erreichen (LÖDDING 2005, SCHUH 2006, WIENDAHL 2010).

2.3.4 Zielsystem der Produktionsplanung und -steuerung

Die Berücksichtigung der teilweise konkurrierenden logistischen und wirtschaftlichen Ziele stellt die größte Anforderung an die PPS dar. WIENDAHL (2010) beschreibt diesen Zustand im *Zielsystem der Produktionslogistik* über die Begriffe Logistikleistung und Logistikkosten (vgl. Abbildung 7).

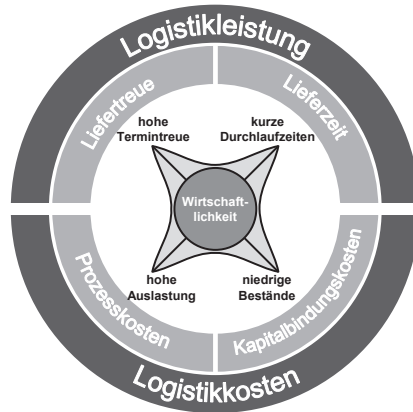


Abbildung 7: Zielsystem der Produktionslogistik (nach WIENDAHL 2010)

Die *Logistikleistung* wird über die vom Markt wahrgenommene Lieferzeit und Liefertreue bewertet. Dies erfordert kurze Lieferzeiten, die mit kurzen Durchlaufzeiten in den Produktionseinheiten einhergehen. Demgegenüber stehen die gering zu haltenden *Logistikkosten*, die zwei Ursprünge haben. Zum einen bestehen sie aus den Prozesskosten, welche durch auftragsabwicklungsbedingte logistische Tätigkeiten, wie z. B. Wareneingang, entstehen und durch eine hohe Auslastung begünstigt werden. Zum anderen sind es die Kapitalbindungskosten, welche durch niedrige Bestände (Rohmaterialien, Halbfabrikate und Fertigwaren) gesenkt werden können. Aus dem daraus resultierenden internen Zielkonflikt, der auf den unterschiedlichen Interessen der Kunden und des Unternehmens basiert, ergibt sich das sog. *Polylemma der Ablaufplanung*. Die Priorisierung der einzelnen Zielgrößen ist in Abhängigkeit von der jeweiligen Situation und der Struktur des Betriebes zu wählen (HACKSTEIN 1989, WIENDAHL 2010).

Im Folgenden werden die vier genannten Zielgrößen der PPS genauer betrachtet, da diese auch gleichzeitig die Basis für die Bewertung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung bilden.

Termintreue

Die Termintreue beschreibt das Verhältnis von rechtzeitig fertiggestellten Aufträgen und der Gesamtheit aller Aufträge. Als Grundlage dienen die bei der Terminierung der Aufträge errechneten Sollendtermine des produktionsplanenden Systems. Als termintreu werden Aufträge gewertet, deren Ist-Endtermin in einem zuvor definierten Termintoleranzfeld um den Sollendtermin liegt (YU 2001). So-

wohl eine starke Verfrühung als auch eine über das Termintoleranzfeld hinausgehende Verspätung von Aufträgen hat zum Teil erhebliche Auswirkungen. Das betrifft zum einen die weiteren Zielgrößen (bei Verfrühung z. B. höhere Bestände; bei Verspätung z. B. Verlängerung der Durchlaufzeit) und zum anderen die vom Kunden wahrgenommenen Leistungen. Dies ist bedingt durch die direkte Abhängigkeit zwischen der Termintreue und der Liefertreue von Unternehmen (LÖDDING 2005). Gerade Steuerungsstrategien, wie z. B. Just-in-Time (JIT) oder Just-in-Sequence (JIS), die eine Reduzierung des Umlaufbestandes zum Ziel haben, können ihr Potential nur entfalten, wenn eine termingerechte Anlieferung gewährleistet ist. Damit lässt sich die hohe Wichtigkeit der Einhaltung von Auftragsterminen und somit auch die Verwendung dieser als häufigste Steuerungsgröße in der Einzel- und Kleinserienfertigung begründen (WIENDAHL 2010).

Durchlaufzeit

Die Durchlaufzeit ist definiert als die Zeitdauer zwischen der Freigabe und dem Bearbeitungsende des betrachteten Produktionsauftrages (WIENDAHL 1997). Sie setzt sich aus den DLZ-Anteilen Rüsten, Bearbeitung, Liegen (vor und nach der Bearbeitung) und Transport je Arbeitsvorgang (auch Durchlaufelement) zusammen (vgl. Abbildung 8).

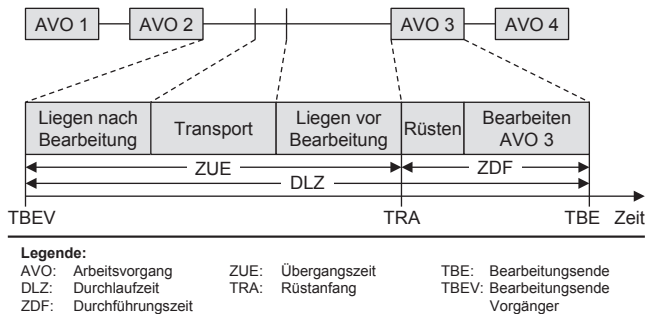


Abbildung 8: DLZ-Anteile eines arbeitsvorgangsbezogenen Durchlaufelementes (nach WIENDAHL 2010)

Das *Rüsten* ist die Tätigkeit, welche erforderlich ist, um das Betriebsmittel eines Arbeitssystems (z. B. Fertigungsmittel) für einen bestimmten Arbeitsvorgang einzurichten (z. B. Werkzeugwechsel). Die *Bearbeitung* stellt die technische Herstellung eines Produktes dar. Unter *Transport* ist die Raumüberbrückung oder Ortsveränderung von Transportgütern mit Hilfe von Transportmitteln zu verstehen. Das *Liegen* stellt die Zeitdauer dar, die ein Arbeitsgegenstand ablauf- oder

störungsbedingt keinen der anderen drei DLZ-Anteile repräsentiert. Hierbei bilden die Liege- und Transportzeiten die sog. Übergangszeit (ZUE) zwischen Arbeitsvorgängen. Das Liegen nach der Bearbeitung sowie der Transport werden hauptsächlich durch die Transportorganisation bestimmt. Dagegen sind die Organisationsform und die Produktionssteuerung im Wesentlichen für die Liegezeit vor der Bearbeitung verantwortlich. Die Durchführungszeit (ZDF) setzt sich aus der Summe von Rüst- und Bearbeitungszeit zusammen. Diese wird maßgeblich von der eingesetzten Fertigungstechnologie, den Produktionsressourcen und der Losgröße bestimmt (ARNOLD ET AL. 2007, WIENDAHL 2010).

Die Durchlaufzeit besitzt einen starken Einfluss auf die Lieferzeit, da sie deren Untergrenze bildet, sofern keine weiteren Zeiten, z. B. Beschaffung von Rohmaterialien, zu berücksichtigen sind. Gerade kurze Durchlaufzeiten bieten die Möglichkeit einer späten Auftragsfreigabe und lassen somit eine längere Berücksichtigung von Kundenwünschen zu. Dies erfordert allerdings auch das Vorhalten niedriger Materialbestände sowie hoher Produktionskapazitäten (HACKSTEIN 1989). Zudem beeinflusst die Streuung der Durchlaufzeit die Termin- und Liefertreue in einem nicht geringen Maße (LÖDDING 2005).

Bestand

Der Bestand ist ein Maß für die Größe des Arbeitsvorrates an einem Arbeitssystem. Er ist als die Summe der Durchführungszeiten der Arbeitsvorgänge, welche zu einem bestimmten Zeitpunkt an einem Fertigungsmittel auf eine Bearbeitung warten, definiert (WIENDAHL 2010). Abbildung 9 stellt den Bestandsverlauf über einen betrachteten Zeitraum grafisch dar. Über die Steigung der Zu- und Abgangskurve lassen sich zudem die mittlere Leistung (auch *Auslastung*) und mittlere Belastung des betrachteten Arbeitssystems ermitteln. Ein hoher Umlaufbestand³ in der Fertigung hat zum einen eine hohe Auslastung der Produktionsressourcen zur Folge. Zum anderen werden aber auch deutlich längere Durchlaufzeiten herbeigeführt. Zudem verdeckt dies Qualitätsmängel in den Prozessen, unabgestimmte Kapazitäten, Ausschuss, unzureichende Flexibilität sowie mangelhafte Liefertreue. Eine bestandsarme Fertigung führt dahingegen zu einer hohen Transparenz und schnellen Reaktionszeiten in der Fertigung (WIENDAHL 2010), beinhaltet jedoch die Gefahr von Materialflussabbrissen (LÖDDING 2005).

³ Der Umlaufbestand entspricht der Summe der Bestände an allen Arbeitssystemen mit Ausnahme der Lagerbestände.

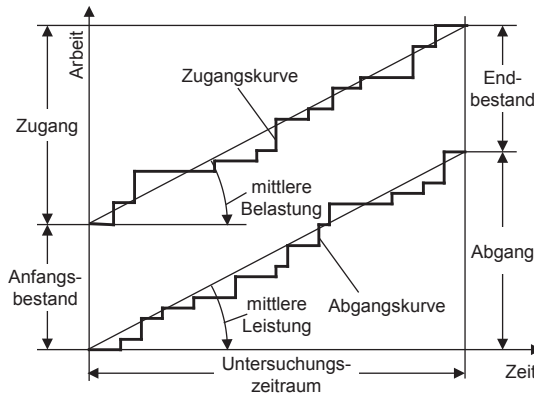


Abbildung 9: Durchlaufdiagramm eines Arbeitssystems (nach WIENDAHL 2010)

Auslastung

Die Auslastung eines Arbeitssystems beschreibt das Verhältnis der tatsächlich erbrachten zur maximal möglichen Leistung. Erstere wird durch den Quotienten aus vollbrachter Arbeit und betrachtetem Zeitraum gebildet (vgl. Abbildung 9). Die maximal mögliche Leistung ist durch die im betrachteten Zeitraum verfügbare Arbeitssystemkapazität bestimmt. Eine hohe Auslastung führt zu einer besseren Verteilung der Gemeinkosten des Arbeitssystems auf die damit hergestellten Produkte und somit zu einem geringeren Stückpreis. Allerdings wirkt sich diese negativ auf die Durchlaufzeiten sowie die Bestände aus, weshalb die Auslastung als Zielgröße stetig an Bedeutung verliert (HACKSTEIN 1989, LÖDDING 2005, WIENDAHL 2010).

Die Beeinflussung der dargestellten vier Zielgrößen erfolgt sowohl innerhalb der Aufgaben der Produktionsplanung (vgl. Abschnitt 2.3.2) wie auch der Produktionssteuerung (vgl. Abschnitt 2.3.3).

2.3.5 Datenverwaltung in der Produktionsplanung und -steuerung

Die Datenverwaltung erfüllt die Aufgabe der Speicherung und Pflege sämtlicher Daten, die für die PPS relevant sind (SCHUH 2006) und erfolgt meist losgelöst vom eigentlichen PPS-System in relationalen Datenbanken. Auf die teilweise sehr komplexen Datenstrukturen wird mit Hilfe definierter Schnittstellen zugegriffen. Prinzipiell werden zwei unterschiedliche Datenarten im Kontext der PPS unterschieden. Diese sind zum einen die Stammdaten und zum anderen die Be-

wegungsdaten. *Stammdaten* besitzen eine hohe Lebensdauer und weisen einen statischen Charakter auf. Im Planungs- und Steuerungsprozess erfolgt auf sie ein ständiger Zugriff. Typische Stammdaten sind u. a. der Materialstamm, Ressourcendaten, Stücklisten, Arbeitspläne, Kundenstammdaten und Lieferantenstammdaten (SCHUH 2006). Im Gegensatz dazu haben *Bewegungsdaten* eine zeitlich beschränkte Lebensdauer. Besondere Merkmale sind der Zeitbezug (z. B. Lagerbestand zu bestimmtem Zeitpunkt) und die Verwaltung von unterschiedlichen Statuszuständen (z. B. Auftrag freigegeben). Hierbei besteht ein ständiger Bezug zu den gespeicherten Stammdaten. Typische Vertreter von Bewegungsdaten sind Lagerbestände, Produktionsaufträge sowie Betriebsdaten (SCHUH 2006).

Das wichtigste Kriterium bei der Verwaltung von Daten in der Produktionsplanung und -steuerung ist die Realisierung einer hohen Qualität⁴ der Daten, da diese die Grundlage für sämtliche Aufgaben der PPS bilden (vgl. Abschnitt 2.3.2 und 2.3.3). Nach HINRICHS (2002, S. 26) ist unter Datenqualität der „*Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Datenproduktes Anforderungen erfüllt*“ zu verstehen. Merkmale eines Datenproduktes sind u. a. die Übereinstimmung der Daten mit der Realität (Fehlerfreiheit) und Aktualität. Zur Bewertung, inwieweit diese die Anforderungen an die Daten erfüllen, existieren zahlreiche Ansätze in der Literatur (vgl. WANG & STRONG 1996, EPPLER & WITTIG 2000, GE & HELFERT 2007). In Tabelle 1 ist exemplarisch die Informationsqualität (IQ) anhand von 15 IQ-Dimensionen nach der DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIONS- UND DATENQUALITÄT E. V. (DGIQ) (2013) dargestellt, welche auf der Arbeit von WANG & STRONG (1996) basieren. Eine ausführliche Beschreibung der IQ-Dimensionen wie auch Metriken findet sich z. B. bei HILDEBRAND ET AL. (2011a) und SPATH ET AL. (2012a).

Kategorie	Dimensionen
System	Zugänglichkeit, Bearbeitbarkeit
Darstellung	Verständlichkeit, Übersichtlichkeit, einheitliche Darstellung, eindeutige Auslegbarkeit
Nutzung	Aktualität, Wertschöpfung, Vollständigkeit, angemessener Umfang, Relevanz
Inhalt	hohes Ansehen, Fehlerfreiheit, Objektivität, Glaubwürdigkeit

Tabelle 1: Informationsqualität (nach WANG & STRONG 1996, DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIONS- UND DATENQUALITÄT E. V. (DGIQ) 2013)

⁴ Qualität ist nach DIN EN ISO 9000:2005 definiert als der „*Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale eines Produktes Anforderungen erfüllt*“.

Der Qualitätsbegriff lässt sich somit auch für Stammdaten formulieren. In diesem Kontext beschreibt folglich der Begriff *Stammdatenqualität* den Erfüllungsgrad der Anforderungen an die für die Planung und Steuerung relevanten Stammdaten. Hierbei sind Fehlerfreiheit, Vollständigkeit, Aktualität, Relevanz und Verständlichkeit als wichtigste Qualitätskriterien für Stammdaten zu nennen (XU ET AL. 2002).

2.3.6 Systeme zur Produktionsplanung und -steuerung

Ein Produktionsplanungs- und -steuerungssystem ist ein Computerprogramm oder ein System aus Computerprogrammen, das den Anwender bei der Produktionsplanung und -steuerung unterstützt und die damit verbundene Datenverwaltung übernimmt. Wie in Abbildung 10 dargestellt, können diese Systeme nach KLETTI (2006) und gemäß der VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1 entsprechend ihrer funktionalen Aufgaben und ihres zeitlichen Horizontes drei Ebenen zugeordnet werden. Diese sind auf der Unternehmensleitebene die Unternehmensleitsysteme (engl. Enterprise Resource Planning (ERP)), auf der Fertigungsleitebene die Fertigungsleitsysteme (engl. Manufacturing Execution System (MES)) und auf der Fertigungsebene (Automatisierungsebene) die Arbeitsplatz-, Maschinen- und Anlagensteuerungen.

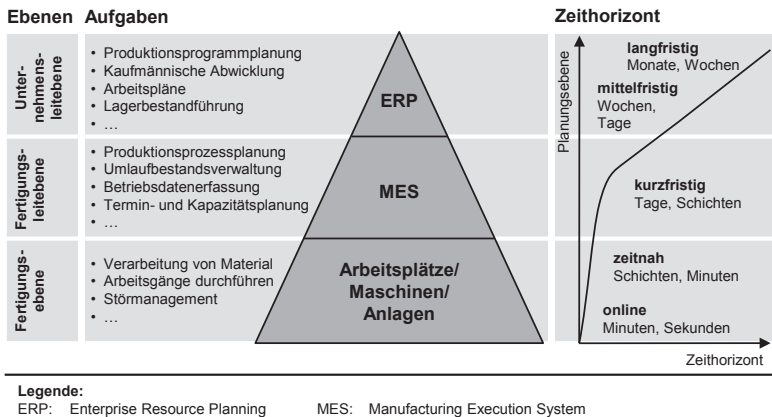


Abbildung 10: Aufgaben und Zeithorizont von PPS-Systemen (nach KLETTI 2006 und VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1)

Aus Auftragsicht ergeben sich folgende grundsätzliche Aufgaben, die mit Hilfe der jeweiligen Systeme erfüllt werden. *Unternehmensleitsysteme* bestimmen die Art und den Umfang der Aufträge (Produktionsprogramm), welche in einem bestimmten Zeitraum zu produzieren sind und dienen zusätzlich für die spätere Abrechnung. *Fertigungsleitsysteme* werden zur Festlegung der Bearbeitungszeitpunkte, der Zuordnung zu Ressourcen sowie der Reihenfolge der Auftragsabwicklung im Produktionsprozess wie auch zu deren Durchführung eingesetzt. Des Weiteren werden Betriebsdaten infolge von Rückmeldungen aus der Fertigungsebene erfasst und diese in verdichteter Form den Systemen der Unternehmensleitebene zur Verfügung gestellt. *Arbeitsplatz-, Maschinen- und Anlagensteuerungen* setzen die Arbeitsgänge entsprechend der Vorgaben der höher liegenden Ebene um (VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1).

2.4 Daten- und Informationsmanagement in der auftragsbezogenen Produktion

2.4.1 Allgemeines

Die primäre Aufgabe des Daten- und Informationsmanagements ist es, den Einsatz der Ressource Information systematisch und methodengestützt zu planen, zu steuern und entsprechend zu kontrollieren. Die Erfüllung dieser Aufgaben erfolgt meist mit Hilfe computergestützter Systeme (JÜNEMANN & BEYER 1998, STICKEL 2001). Diese werden als Informationssysteme bezeichnet und umfassen die „*Summe aller geregelten betriebsinternen und -externen Informationsverbindungen sowie deren technische und organisatorische Einrichtung zur Informationsgewinnung und -verarbeitung*“ (SPRINGER GABLER VERLAG 2014). Die dabei auftretenden Informationsflüsse können vom Materialfluss entkoppelt oder synchron verlaufen (JÜNEMANN & BEYER 1998). Unter Informationsfluss ist in diesem Kontext die informationstechnische Bereitstellung, Weitergabe wie auch der Austausch von Daten zu verstehen, welcher aus den Phasen Informationserzeugung, -übermittlung, -verarbeitung, -speicherung und -verwertung besteht (HEIDERICH 2001). Die Gewährleistung des mit dem Materialfluss in Zusammenhang stehenden Informationsflusses stellt demnach die eigentliche Funktion der Auftragsabwicklung dar (PFOHL 2010).

Nach PILLER (2006) ist die Information notwendiger Bestandteil zur Überführung von Produktionsfaktoren in Produkte. Dies wird ebenfalls deutlich, da über die Hälfte der Wertschöpfungskosten in den Faktor Information fließen (KLETTI

2006). Es lässt sich somit ableiten, dass gerade in der auftragsbezogenen Produktion die Wertschöpfung auf der Informationsebene stattfindet (REICHWALD & PILLER 2002). Dies führt dem Informationsmanagement eine herausragende Rolle zu, da dieses die Grundlage für die Optimierung der logistischen Zielgrößen (vgl. Abschnitt 2.3.2) wie auch die Realisierung der Flexibilitätsanforderungen (vgl. Abschnitt 2.2) schafft (SETHI & SETHI 1990, KURBEL 2005). Es hat somit die Aufgabe, für die Planung, Durchführung und Überwachung von betrieblichen Vorgängen die richtige Informationsmenge zur richtigen Zeit am richtigen Ort bereitzustellen (JÜNEMANN & BEYER 1998, HEIDERICH 2001). Auf der einen Seite ist dies die Voraussetzung, auf unvorhergesehene Ereignisse schnell reagieren zu können (HEIDERICH 2001, KLETTI 2006). Auf der anderen Seite bildet dies die Basis zur Optimierung von Produktionsabläufen (JÜNEMANN & BEYER 1998) und erfordert jeweils die Erfassung und Verarbeitung von Betriebsdaten.

2.4.2 Betriebsdatenerfassung

Die Betriebsdatenerfassung umfasst alle Maßnahmen, die erforderlich sind, um Betriebsdaten in einer maschinell lesbaren Form am Ort ihrer Verarbeitung bereitzustellen (ROSCHMANN 1979, CORSTEN & GÖSSINGER 2009). Damit erfüllt sie die Aufgabe, Ist-Daten im Produktionsprozess aufzunehmen, welche zum einen in der Produktionssteuerung Verwendung finden. So können auf Basis des vorliegenden Produktionsfortschrittes zeitnah korrektive Maßnahmen im Bedarfsfall eingeleitet werden, um zuvor festgelegte Ziele trotz unvorhersehbarer Zwischenfälle dennoch zu erreichen. Zum anderen werden die aufgenommenen Informationen zur Erstellung realistischer Produktionspläne und der damit einhergehenden Aktualisierung von Stammdaten eingesetzt (KURBEL 2011). Die betrachteten Betriebsdaten werden gemäß des Verwendungszweckes bestimmt und bestehen nach ZELEWSKI ET AL. (2008) u. a. aus der Ausführungsdauer einzelner Arbeitsgänge, der Durchlaufzeit von Produktionsaufträgen, den Qualitätsmerkmalen, Materialbewegungen sowie Zustandsinformationen von Produktionsressourcen, die durch Kennzahlen (vgl. Abschnitt 2.5) dargestellt werden können. Ausgehend vom notwendigen Aktualitätsgrad der Betriebsdaten werden Art und Weise der Datenerfassung, -verarbeitung und -übermittlung festgelegt (KURBEL 2011). Grundsätzlich werden hier die Online- und die Offline-Erfassung unterschieden. Bei der Online-Erfassung besteht eine direkte Datenverbindung zwischen dem Erfassungsgerät und einem BDE-Rechner. Somit können die aufgenommenen Informationen nach einer lokalen Verarbeitung unmittelbar an weitere Systeme (z. B. MES) übertragen werden. Im Gegensatz dazu

werden bei der Offline-Erfassung die Betriebsdaten auf einem Medium (z. B. Papier) zwischengespeichert und erst zeitverzögert dem BDE-Rechner übergeben. Diese Art der Erfassung beinhaltet jedoch die Gefahr, dass die Daten fehlerhaft (z. B. durch manuelle Eingabe am BDE-Terminal), zeitverzögert (z. B. Eingabe der Daten erst am Schichtende) oder auch gar nicht erfolgen (KURBEL 2005). Allgemein bestehen BDE-Systeme sowohl aus der Hardware, die zur Aufnahme der Betriebsdaten erforderlich ist, wie auch der Software, die benötigt wird, um die BDE-Aufgaben zu erledigen (ROSCHMANN 1979). Zur Identifikation von Produkten wird sog. Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) eingesetzt.

2.4.3 Informations- und Kommunikationstechnik

Unter Informations- und Kommunikationstechnik ist nach KRCMAR (2010, S. 30) „die Gesamtheit der zur Speicherung, Verarbeitung und Kommunikation zur Verfügung stehenden Ressourcen sowie die Art und Weise, wie diese Ressourcen organisiert sind“ zu verstehen. Dies umfasst alle Technologien „auf der Basis der Mikroelektronik, Computertechnik, digitalen Übertragungstechnik sowie der optischen Nachrichtentechnik, die der Erfassung, Verknüpfung, Auswertung, Speicherung, Darstellung und Übertragung sowie Ausgabe von Informationen dienen“ (PILLER 2006, S. 24). Ihr Zweck liegt in erster Linie darin, Medienbrüche zwischen der physischen und virtuellen Welt zu eliminieren und sie ermöglichen eine vollautomatisierte Maschine-Maschine-Kommunikation zwischen realen Elementen in der Produktion und Informationssystemen (FLEISCH & FRIEDEMANN 2005).

Zur Identifikation bzw. Datenerfassung von Einzelprodukten oder Gebinden im Produktionsprozess finden in diesem Kontext sog. *Automatische Identifikations-Technologien* (Auto-ID-Technologien) Anwendung (KERN 2006). Sie zeichnen sich primär dadurch aus, dass sie es ermöglichen, Objekte eindeutig anhand von spezifischen Merkmalen maschinell zu erkennen. Die bekanntesten Auto-ID-Technologien sind Barcode, Optical Character Recognition (OCR), Chipkarten, Radio-Frequency Identification (RFID) sowie biometrische Verfahren (z. B. Fingerabdruck- und Spracherkennungsverfahren) (FINKENZELLER 2006). Die jeweiligen Funktionsweisen, mit Ausnahme der biometrischen Verfahren, werden im Folgenden kurz erläutert. Der *Barcode* (Strichcode) ist ein Binär-code aus parallel stehenden Strichen und Lücken, deren Anordnung nach einem vorbestimmten Muster erfolgt. Die Sequenz aus breiten und schmalen Strichen stellt Elemente

von Daten dar und kann numerisch oder alphanumerisch interpretiert werden. Der Lesevorgang erfolgt mit Hilfe einer optischen Laserabtastung. Bekannte Vertreter des Barcodes sind u. a. EAN-Code, 2D-Matrix-Code. Die *Optical Character Recognition* (dt. Klarschriftleser) verwenden speziell entwickelte Schrifttypen, die sowohl von Menschen als auch Maschinen gelesen und interpretiert werden können. Aufgrund der hohen Kosten der Lesegeräte finden sie trotz der hohen Informationsdichte sowie der Möglichkeit der visuellen Datenerfassung nur in speziellen Bereichen (z. B. Erfassung der Überweisungsträger in einer Bank) Anwendung. *Chipkarten* stellen elektronische Datenspeicher dar, bei denen der Datenaustausch durch galvanisches Kontaktieren erfolgt. Sie verfügen über eine hohe Sicherheit der gespeicherten Daten, sind aber aufgrund der kontaktbehafteten Datenübertragung für viele Anwendungen, u. a. wegen der hohen Abnutzungserscheinungen, ungeeignet. Zur besseren Handhabung sind sie meist in Plastikkarten (z. B. EC-Karte) integriert. Ein *Radio-Frequency Identification-System* (RFID-System) besteht nach VDI-Richtlinie 4416 aus den drei Komponenten Transponder, Schreib-/ Lese-Gerät und Rechner. Der Transponder ist ein elektronischer Datenträger und beinhaltet ein Kopplungselement sowie einen Mikrochip. Mit Hilfe des Schreib-/ Lesegerätes werden durch elektromagnetische Wellen die Daten auf dem Transponder kontaktlos gelesen und bei Bedarf verändert. Der Rechner dient zur Ansteuerung und zur Realisierung des Datenaustausches durch eine Applikationssoftware. Ein wesentlicher Unterschied zu den restlichen Auto-ID-Technologien liegt in der gleichzeitigen Erfassung mehrerer Objekte (Pulkfähigkeit) sowie des nicht notwendigen (Sicht-) Kontaktes zwischen Transponder und Schreib-/ Lesegerät (FINKENZELLER 2006, KERN 2006).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass RFID erhebliche funktionale Vorteile gegenüber anderen Auto-ID-Technologien zur Anwendung in der Produktion aufweist. Gerade durch die Integration von Transpondern in Produkte können deutliche Verbesserungen in den logistischen Abläufen durch die Parallelisierung von Material- und Informationsfluss realisiert werden (GÜNTNER & TEN HOMPEL 2010). Grundsätzlich ist hier zu unterscheiden, ob der Transponder allein zur Identifikation dient (ID-on-Tag/ Data-on-Network) oder zusätzlich spezifische produktbezogene Daten mitgeführt werden (Data-on-Tag) (vgl. Abbildung 11) (DIEKMANN ET AL. 2007, GÜNTNER & TEN HOMPEL 2010).

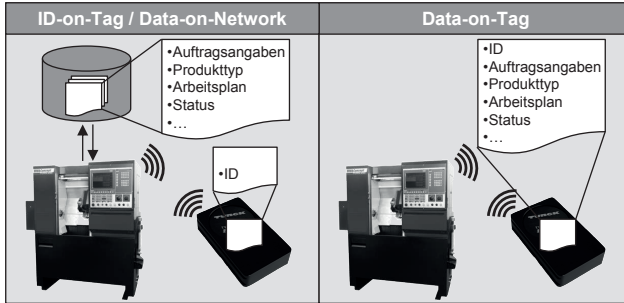


Abbildung 11: Datenhaltungskonzepte ID-on-Tag/ Data-on-Network versus Data-on-Tag (nach OSTGATHE 2012)

Bezogen auf die von ZBIB ET AL. (2008) beschriebenen Klassen intelligenter Produkte entspricht dies den Klassen 1 (Identifikation) und 2 (Identifikation und Speicherplatz) (vgl. Tabelle 2). Im Fortgang der Arbeit werden unter dem Terminus *intelligentes Produkt* grundsätzlich Produkte der Klasse 2 verstanden.

Fähigkeit	Klasse 1	Klasse 2	Klasse 3	Klasse 4
Identifikation	X	X	X	X
Speicherplatz	-	X	X	X
Datenverarbeitung	-	-	X	X
Interaktion/ Kommunikation	-	-	-	X

Tabelle 2: Klassen intelligenter Produkte (nach ZBIB ET AL. 2008)

2.5 Kennzahlen und Kennzahlensysteme

Zur Wiedergabe quantitativ messbarer Sachverhalte in einer aussagekräftigen, komprimierten Form dienen nach WÖHE & DÖRING (2010) *Kennzahlen* (engl. Key Performance Indicators (KPI)). Nach statistisch-methodischen Gesichtspunkten sind sie entweder absolute Zahlen oder Verhältniszahlen. *Absolute Zahlen* lassen sich u. a. in Einzelzahlen, Summen und Differenzen unterteilen. Demgegenüber gehören Gliederungszahlen, Beziehungszahlen und Indexzahlen zu den *Verhältniszahlen* (MALUCHE 1979) und setzen Sachverhalte gegenseitig in Beziehung (Beziehungsgröße im Zähler und Beziehungsgrundlage im Nenner) (PREIBLER 2008). Unter einem *Kennzahlensystem* wird nach LACHNIT (1976, S. 216) *“eine geordnete Gesamtheit von Kennzahlen, die in sachlich sinnvoller Beziehung zueinander stehen, sich gegenseitig ergänzen und als Gesamtheit dem*

Zweck dienen, den Betrachtungsgegenstand möglichst ausgewogen und vollständig zu erfassen“ verstanden. Wie Kennzahlen im Speziellen müssen auch Kennzahlensysteme im Allgemeinen bestimmte qualitative Anforderungen erfüllen. In der Literatur werden hauptsächlich fünf Kriterien genannt, die ein nützliches Kennzahlensystem zwingend erfüllen sollte. Nach SIEGWART ET AL. (2010, S. 55) sind dies *Problemangemessenheit, Konsistenz, Flexibilität, Benutzer- und Organisationsadäquanz* sowie *Wirtschaftlichkeit*. Kennzahlensysteme dienen nach MEYER (2011) vornehmlich den Funktionen der *Analyse*, der *Lenkung* bzw. *Steuerung* und der *Dokumentation*. Im Falle der Anwendung der Kennzahlen als Steuerinstrument, sind unternehmens- bzw. anwendungsspezifische Grenzwerte (Warn- und Eingriffsgrenzen) festzulegen.

Kennzahlensysteme werden im Bereich der Produktion zur Bewertung deren Leistungsfähigkeit eingesetzt. Eines der ersten Kennzahlensysteme dieser Art wurde von MALUCHE (1979) vorgestellt. Mit diesem wird das Ziel verfolgt, eine Vielzahl von bereits vorliegenden fertigungsbezogenen Daten (u. a. Arbeitsplan- und Maschinendaten) zu einem überschaubaren System von Kennzahlen zu aggregieren. Die Einteilung der Kennzahlen erfolgt nach den Faktoren Material, Personal und Betriebsmittel und bietet die Möglichkeit der stufenweisen Verdichtung von elementaren Kennzahlen zu Gesamtkennzahlen. Im Fokus der Arbeiten von GROTH (1992) und BILSING (2007) steht ebenfalls die Beurteilung und Analyse der Leistungsfähigkeit der Fertigung. BILSING (2007) führt die Betrachtung auf den Kriterien Produktivität, Flexibilität und Qualität durch. GROTH (1992) hingegen konzentriert sich ausschließlich auf das Kriterium Produktivität, welches in die personalbezogene Arbeitsproduktivität, die organisationsbezogene Durchlaufzeitproduktivität und die technikorientierte Maschinenproduktivität unterteilt ist. Weitere Kennzahlensysteme für die Bewertung der Leistungsfähigkeit der Produktion bzw. Logistik stammen u. a. von SYSKA (1990), GRONAU (1994) und AICHELE (1997).

2.6 Technische Wissensverarbeitung

2.6.1 Allgemeines

Bei Wissen handelt es sich um eine umfangreiche, schwer zu charakterisierende und vor allem sich ständig verändernde Menge an Informationen, welche in vielen Quellen vorhanden ist (KAFKA 1999). Diese sind u. a. Personen, Datenbanken, Dokumente unterschiedlicher Erscheinungsformen sowie graphische und

verbale Darstellungen. Wissen wird benötigt, um Probleme und Aufgaben aller Art zu lösen. Um es Personen oder Systemen verfügbar zu machen, bedarf es zum einen, dieses Wissen zu erwerben und zum anderen, dieses entsprechend der geplanten Anwendung zu verarbeiten und bereitzustellen.

Unter dem Begriff *Wissen* wird nach STICKEL (2001, S. 2) die „*Gesamtheit aller Kenntnisse und Fähigkeiten auf einem bestimmten Gebiet*“ verstanden. SCHMIDT & SCHISCHKOFF (1968, S. 665) spezifizieren diesen Begriff noch um die objektive und subjektive Gewissheit, daraus Schlussfolgerungen zu bilden, die ebenfalls sicher genug sind, um selbst als Wissen zu gelten. In der Informationstechnik besteht ein enger Zusammenhang zwischen Wissen, Informationen, Daten und Zeichen, der mit Hilfe der Wissenstreppe von NORTH (2011) (vgl. Abbildung 12) beschrieben werden kann.

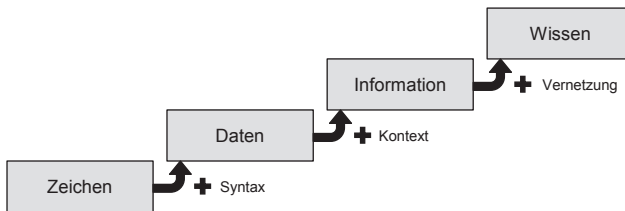


Abbildung 12: Wissenstreppe (nach NORTH 2011)

Zeichen stellen dabei das kleinste Datenelement dar, welches aus einem Zeichenvorrat (z. B. Buchstabe, Ziffer, Sonderzeichen) genommen werden kann, und sind zusammenhangslos. Erst durch die Zuordnung einer Syntax werden aus Zeichen *Daten*. Diese liegen dann strukturiert vor und stehen in einem Zusammenhang zueinander. Sie weisen allerdings noch keinen Verwendungshinweis auf. Werden diese in einen Kontext eingebunden und zweckorientiert verwendet, handelt es sich schließlich um *Informationen*. Werden diese miteinander vernetzt und in Verbindung gesetzt entsteht *Wissen*. Um es für Anwendungen verfügbar zu machen, ist es erforderlich, dieses Wissen zu formalisieren, in einem IT-System zu repräsentieren und gemäß der Problemlösungsstrategie zu manipulieren (PUPPE 1991).

Nach SIMON (1984) ist unter *Lernen* jede Veränderung eines Systems zu verstehen, die es diesem erlaubt, eine Aufgabe bei der Wiederholung derselben oder einer vergleichbaren Aufgabe besser zu lösen. ZIMBARDO ET AL. (1992, S. 227) beschreiben Lernen als einen Prozess, „*der zu relativ stabilen Veränderungen im*

Verhalten oder im Verhaltenspotential führt und auf Erfahrung aufbaut. Lernen ist nicht direkt zu beobachten. Es muss aus den Veränderungen des beobachteten Verhaltens erschlossen werden“. Dies entspricht auch der Definition von LORENZ (1978), die besagt, dass Lernen eine adaptive Modifikation von Verhaltensmustern mit arterhaltender Wirkung ist. Bezogen auf die Zielsetzung dieser Arbeit wird im Weiteren unter Lernen der Zuwachs und/ oder die Modifikation von Wissen verstanden, welches auf Beobachtungen, mit dem Ziel unter gleichen oder ähnlichen Bedingungen eine Verbesserung zu realisieren, aufbaut.

Zur technischen Verarbeitung von Wissen finden hierfür speziell entwickelte Verfahren Anwendung. Die zugehörige Fachdisziplin, das *maschinelle Lernen*, ist ein Teilgebiet der Künstlichen Intelligenz (KI), welche sich mit Methoden befasst, durch die Systeme Wissen selbstständig aufbauen bzw. vorhandenes Wissen erweitern können (MICHALSKI & KODRATOFF 1990). Zudem wird die Aufgabe erfüllt, bestehende Mängel in der Wissensbasis zu schließen (SÄUBERLICH 2000). Eine Klassifizierung der dabei zur Anwendung kommenden Lernverfahren erfolgt üblicherweise nach den zugrundeliegenden Lernstrategien (vgl. Abbildung 13). Diese sind aus Beobachtungen des Menschen abgeleitet und lassen sich grundsätzlich entsprechend der steigenden Anforderungen an das Lernsystem anordnen (WEIGT 1999).

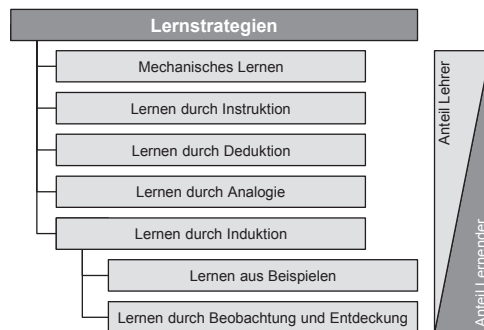


Abbildung 13: Übersicht von Lernstrategien (nach WEIGT 1999)

Eine weitere anerkannte Klassifikation der wissensverarbeitenden Verfahren erfolgt nach der Art der Wissensrepräsentation. Nach MADEY ET AL. (1994) sind dies Verfahren zur Informationsverarbeitung, Verfahren zur numerischen Verarbeitung, Verfahren zur symbolischen Verarbeitung und Verfahren zur subsymbolischen Verarbeitung. Abbildung 14 liefert einen Gesamtüberblick über die ver-

schiedenartigen Integrations- und Kombinationsformen sowie die Einordnungsmöglichkeiten intelligenter und konventioneller Verfahren. Die beiden erstgenannten Verfahren sind hierbei der Kategorie der konventionellen Techniken zuzuordnen und werden im Weiteren nicht betrachtet. Die beiden letztgenannten bilden demgegenüber die intelligenten Verfahren. Die zugeschriebenen Technologien können als Spektrum zwischen den beiden extremen Paradigmen zur Verarbeitung von Wissen betrachtet werden.

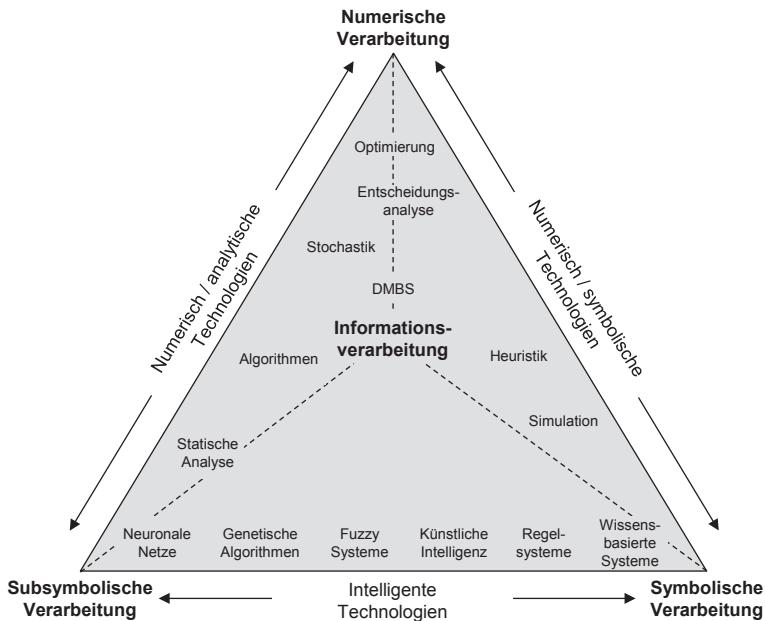


Abbildung 14: Klassifikationsmodell der problemlösenden Methoden sowie Einordnung unterschiedlicher Technologien (nach MADEY ET AL. 1994)

Auf der einen Seite sind die *symbolischen Verfahren* angeordnet. Die Verarbeitung von Wissen erfolgt infolge der Manipulation von Symbolen. Hierbei findet eine Betrachtung von rein analytischen Problemstellungen statt, die durch kausal erklärbare Handlungsmuster, z. B. Regeln oder Logiken, exakt formalisierbar sind (PUPPE 1991). Beispielhaft sind hier wissensbasierte Systeme als bekannte Vertreter zu nennen. Auf der anderen Seite stehen die *subsymbolischen Verfahren*. Die Informationsverarbeitung erfolgt hierbei als Interaktion einer großen Anzahl einfacher Einheiten (Zellen, Neuronen). Dabei werden anregende oder

hemmende Signale an andere Zellen versendet. Üblicherweise erfolgt die Darstellung von Symbolen nur implizit in Form eines Aktivierungsmusters der jeweiligen Einheiten (verteilte Wissensrepräsentation). Neuronale Netze stellen einen typischen Vertreter dieser Verfahren dar. Zusammenfassend werden die wesentlichen Unterscheidungskriterien dieser beiden Ansätze in Tabelle 3 dargestellt.

Kriterium	subsymbolischer Ansatz	symbolischer Ansatz
Lernfähigkeit	leicht	schwer
Erklärungsfähigkeit	keine	gut
Verarbeitungsgeschwindigkeit	langsam	schnell
Algorithmus	parallel	sequentiell
Umgang mit verrauschten Daten	gut	schlecht
Generalisierung	leicht	schwierig
Wissensrepräsentation	schwierig	leicht

Tabelle 3: Vergleich zwischen symbolischem und subsymbolischem Ansatz zur Wissensverarbeitung (nach LALLEMENT & ALEXANDRE 1997)

Aufgrund der Zielstellung dieser Arbeit und die Betrachtung von analytisch lös-
baren Problemen werden im Weiteren dieses Kapitels die Betrachtungsschwer-
punkte auf symbolische Ansätze, hier wissensbasierte Systeme (vgl. 2.6.2), sowie
den Wissenserwerb in Datenbanken, das sog. *Knowledge Discovery in Databases*
(vgl. 2.6.3), gelegt. Für subsymbolische Ansätze, wie z. B. Neuronale Netze, sei
auf weiterführende Fachliteratur (z. B. SCHERER 1997) verwiesen.

2.6.2 Wissensbasierte Systeme

2.6.2.1 Allgemeines

Wissensbasierte Systeme (WBS) haben die Fähigkeit, Entscheidungen auf dem
Kenntnis- und Wissensstand von Fachleuten zu treffen bzw. bei diesen zu unter-
stützen (BLUMBERG 1991, S. 16). Sie stellen ein Softwaresystem dar, „*bei dem
das Fachwissen über ein Anwendungsgebiet [...] explizit und unabhängig vom
allgemeinen Problemlösungswissen dargestellt wird*“ (KURBEL 1992, S. 18). Es
besteht somit aus zwei voneinander unabhängigen Komponenten, der *Wissensba-
sis* und der *Wissensverarbeitung*. Dies führt zum einen dazu, dass eine klare
Trennung zwischen Problembeschreibung und Problemlösung realisiert werden
kann und zum anderen ist das Wissen über den betrachteten Anwendungsbereich

direkt ausdrückbar (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008). Hierbei weisen sie die Eigenschaften *Flexibilität*, *Kompetenzsicherung*, *Transparenz* und *Benutzerfreundlichkeit* auf (BLUMBERG 1991, S. 72).

Expertensysteme stellen im engeren Sinne eine spezielle Form von wissensbasierten Systemen dar. Sie grenzen sich lediglich durch die Art der Wissensbereitstellung, hier durch den Experten, ab (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008, S. 11). Da nach diesem Kriterium viele der existierenden WBS Expertensysteme darstellen, werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit diese beiden Begriffe synonym verwendet.

2.6.2.2 Architektur eines wissensbasierten Systems

Die bereits erwähnte Trennung zwischen der Wissensbasis und der Wissensverarbeitung kann, wie in Abbildung 15 dargestellt, weiter untergliedert werden. Im Folgenden werden die einzelnen Komponenten separat betrachtet.

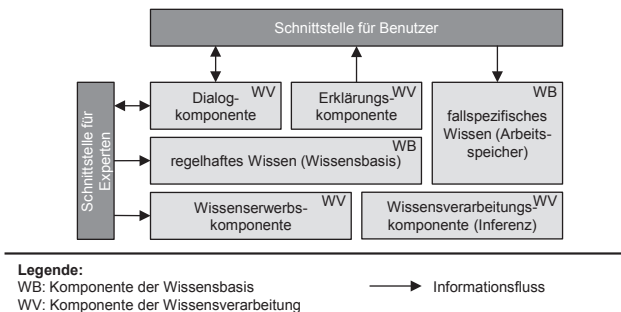


Abbildung 15: Schematischer Aufbau eines wissensbasierten Systems (nach BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008, S. 18)

Die Wissensbasis setzt sich aus dem fallspezifischen und dem regelhaften Wissen zusammen. Das *fallspezifische Wissen* ist die spezifischste Art von Wissen, die sich ausschließlich auf den betrachteten Problemfall bezieht. Sie besteht aus Fakten, die von Beobachtungen oder Untersuchungsergebnissen stammen. Demgegenüber stellt das *regelhafte Wissen* das eigentliche Kernelement der Wissensbasis dar. Zum einen besteht es aus bereichsbezogenem Wissen, welches das Anwendungsgebiet der betrachteten Fälle generisch beschreibt. Zum anderen bildet es Allgemeinwissen ab, wie z. B. Problemlösungsheuristiken oder Opti-

mierungsregeln wie aber auch Beziehungswissen (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008, S. 11).

Zur Wissensverarbeitung enthält das WBS Komponenten, die zum einen der Verarbeitung des Wissens und zum anderen der Interaktion zwischen Benutzer/ Experte und WBS dienen. Die *Wissensverarbeitungskomponente* (auch Inferenzkomponente genannt) hat nach KURBEL (1992, S. 28) „die Aufgabe, das in der Wissensbasis enthaltene Wissen auszuwerten, indem Schlussfolgerungen gezogen und neue Wissenseinheiten erzeugt und der Wissensbasis hinzugefügt werden. Die Reihenfolge in der das Wissen ausgewertet wird, ermittelt die Problemlösungskomponente auf der Grundlage einer bestimmten Abarbeitungsstrategie (Kontrollstrategie)“. Demnach bildet die Wissensverarbeitungskomponente den Grundgedanken eines wissensbasierten Systems ab, indem sie Wissen interpretiert und eine Lösung des vom Benutzer spezifizierten Problems erzeugt (BOERSCH ET AL. 2007, S. 7). Die *Dialogkomponente* ermöglicht eine Interaktion zwischen Benutzer/ Experte und System. Im speziellen Fall der wissensbasierten Systeme wird dabei typischerweise zwischen einer Schnittstelle für Experten des jeweiligen Bereichs für Aufbau und Entwicklung sowie einer Benutzerschnittstelle für die Anwender des Systems (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008, S. 18) unterschieden. Im Kontext des Benutzers dient sie vorrangig dazu, mit diesem einen Dialog zu führen und Daten einzulesen, um daraus fallspezifisches Wissen abzuleiten (BOERSCH ET AL. 2007, S. 7). Zudem hat sie die Aufgabe, das Wissen aus der systeminternen Darstellung so aufzubereiten, dass es für den Anwender verständlich ist (KURBEL 1992, S. 28). Im Gegensatz dazu ist es Aufgabe der *Wissenserwerbskomponente*, das notwendige Wissen des Experten der Wissensbasis verfügbar zu machen. Sie dient dem Aufbau und der Wartung der Wissensbasis (BOERSCH ET AL. 2007, S. 7). Es kann aber nicht nur neues Wissen aufgenommen werden. Es ist auch möglich, bereits vorhandenes zu ändern oder obsoletes Wissen zu entfernen (KURBEL 1992). Die *Erklärungskomponente* hat die Aufgabe, zu den Schlussfolgerungen, die durch das WBS abgeleitet wurden, eine Erklärung zu generieren, wie diese zustande gekommen sind. Auf diese Weise wird der Lösungsweg des Systems transparent und für den Benutzer nachvollziehbar gemacht (BOERSCH ET AL. 2007, S. 7, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008, S. 18).

2.6.2.3 Wissensrepräsentation

Unter der Wissensrepräsentation werden Verfahren zum Kodieren und Speichern von Wissen in Form von Fakten sowie deren gegenseitigen Beziehungen verstanden (BIENIEK 2001). Um das in der Wissensbasis vorhandene Wissen zu repräsentieren, existieren unterschiedliche Grundtechniken. Diese sind u. a. die logikbasierte, regelbasierte, fallbasierte und objektorientierte Repräsentation (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008), welche im Folgenden kurz erläutert werden.

Logikbasierte Repräsentation

Mit Hilfe von Logik lassen sich innerhalb von WBS Inferenzrelationen abbilden (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008). Nach PEIRCE (1978) umfasst dies die Deduktion, die Induktion und die Abduktion. Die *Deduktion* setzt die Annahme voraus, dass die getroffenen Schlussfolgerungen stets korrekt sind und somit das neu abgeleitete Wissen auch stets wahr ist. In der Regel wird von einem allgemeinen Fall auf einen speziellen Fall geschlossen. Die *Induktion* basiert auf der Vorstellung, dass sich allgemeine Zusammenhänge aus einzelnen Sachverhalten erschließen lassen. Dabei wird nun, im Gegensatz zum deduktiven Schluss, nicht mehr die Allgemeingültigkeit der induktiv ermittelten Regel vorausgesetzt. Demgegenüber wird bei der *Abduktion* (Hypothese) durch die Anwendung eines allgemeinen Zusammenhangs auf eine vorliegende Beobachtung ein Sachverhalt abgeleitet. Dabei muss das so erhaltene Wissen, wie bei der Induktion, nicht zwangsläufig wahr sein. Durch Abduktion kann also eine (mögliche) Erklärung für einen beobachteten Sachverhalt gefunden werden. Jedoch könnte aber auch eine andere Ursache zugrunde liegen.

In WBS wird Logik nur selten als direktes Mittel zur Wissensrepräsentation verwendet. Allerdings wird sie häufig als Grundlage für weitere Repräsentationsformalismen, welche logische Verknüpfungen nutzen, eingesetzt (z. B. Regeln).

Regelbasierte Repräsentation

Regeln stellen die am häufigsten verwendete Form zur Repräsentation von Wissen dar. Folglich basieren die meisten der bekannten WBS auf Regeln. Regeln sind formalisierte Konditionalsätze, die unter erfüllten Voraussetzungen bestimmte Schlussfolgerungen ableiten lassen (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008). Sie bestehen zum einen aus einem Voraussetzungsteil (Prämisse) und zum anderen aus einem Schlussfolgerungsteil (Konklusion) und haben folgenden typischen Aufbau:

WENN *Prämisse* DANN *Konklusion*

Die Prämisse kann hierbei nur aus einer einzelnen Aussage, aber auch als Konjunktion von mehreren Einzelaussagen bestehen. Disjunktionen sind prinzipiell ebenfalls möglich, sollten allerdings auf Grund der mehrfachen Formulierung der Regel vermieden werden. Die Konklusion kann ebenso aus einer Konjunktion von Einzelaussagen bestehen. Nicht erlaubt sind Disjunktionen. Die Umkehrung einer Aussage wird Negation genannt. Um Fakten zu repräsentieren, werden Regeln in Form unbedingter Ausdrücke, d. h. nur Konklusionsteil ohne voraussetzende Prämisse, formuliert (BLUMBERG 1991, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008).

Bei der regelbasierten Repräsentation werden grundsätzlich zwei Inferenzrichtungen unterschieden. Dies sind die Vorwärts- und die Rückwärtsverkettung. Bei der *Vorwärtsverkettung* (datengetriebene Inferenz) dient das bekannte Wissen als Startpunkt für den Schlussfolgerungsprozess. Aus erfüllten Prämissen wird die Konklusion hergeleitet, wobei diese neu abgeleiteten Fakten erneut als Wissen in den Inferenzprozess eingehen können. Die Vorwärtsverkettung kann angewandt werden, um einen Überblick über das Gesamtsystem zu erhalten. Demgegenüber steht bei der *Rückwärtsverkettung* (zielorientierte Inferenz) der Zustand bestimmter Knoten im Vordergrund. Den Ausgangspunkt stellt ein Zielobjekt dar, über dessen Zustand Informationen gesammelt werden sollen. Das System durchsucht dann die Regelbasis nach geeigneten Regeln, die das Zielobjekt als Konklusion enthalten und gibt die Prämissen als Zwischen- oder Endergebnisse aus (PUPPE 1991, BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008).

Fallbasierte Repräsentation

Bei der fallbasierten (engl. case-based) Repräsentation besteht die Wissensbasis aus einer Sammlung von Fällen, die spezifisches Erfahrungswissen beinhalten. Hierbei repräsentiert ein Fall „*Wissen im Kontext und dokumentiert eine Erfahrung, die eine wichtige Aussage bzw. Lehre im Hinblick auf gewisse Ziele beinhaltet*“ (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008, S. 171). Ein Fall besteht potentiell aus den Elementen *Problem- bzw. Situationsbeschreibung*, *Lösung* und *Resultat*.

Generell werden beim fallbasierten Schließen zwei Grundtypen unterschieden (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008). Dies ist zum einen das *problemlösende fallbasierte Schließen*, das die Lösung eines ähnlichen früheren Falles als Lösung des neuen Falles vorschlägt und gegebenenfalls anpasst. Zum anderen steht beim *interpretativen fallbasierten Schließen* die adäquate und differenzierte Beurteilung einer aktuellen Situation im Vordergrund. Dies erfolgt durch den Vergleich

ähnlicher Fälle in der Fallbasis. Grundsätzlich erfolgt das Lösen eines neuen Problems durch das Identifizieren der relevantesten Fälle in der Falldatenbasis und deren Übertragung in geeigneter Form auf die aktuelle Aufgabenstellung. Der Prozess des fallbasierten Schließens ist in Abbildung 16 dargestellt.

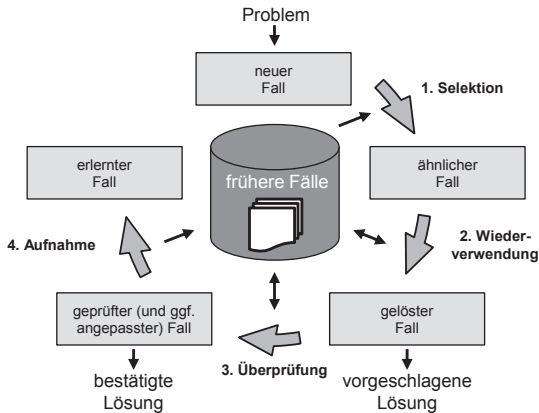


Abbildung 16: Zyklus des fallbasierten Schließens (nach AAMODT & PLAZA 1994)

Dieser besteht nach AAMODT & PLAZA (1994) aus vier elementaren Schritten:

1. *Selektion* (engl. Retrieve): Auswahl eines oder mehrerer ähnlicher Fälle auf Grundlage eines neuen Falls, der das zu lösende Problem repräsentiert.
2. *Wiederverwendung* (engl. Reuse): Adaption der gefundenen Fälle und Ableitung einer Lösung für das neue Problem.
3. *Überprüfung* (engl. Revise): Überprüfung und ggf. iterative Anpassung der gefundenen Lösung.
4. *Aufnahme* (engl. Retain): Speicherung der Lösung als neu erlernter Fall in der Wissensbasis.

Im Gegensatz zu anderen Repräsentationsformen handelt es sich bei der fallbasierten Beschreibung somit um einen erfahrungsbasierten und nicht regelbasierten Vorgang bei der Problemlösung.

Objektorientierte Repräsentation

Die objektorientierte Darstellung von Informationen stellt ein übergeordnetes Konzept der Datenspeicherung dar. So können beispielsweise Regeln oder Fälle auch als Objekte betrachtet werden. Objekte bieten die Möglichkeit Informatio-

nen in Strukturen abzulegen, diesen Methoden zuzuordnen und Vererbungshierarchien aufzubauen. Objektorientierung ist in modernen Programmiersprachen mittlerweile weit verbreitet und stellt somit keine spezielle Eigenheit von wissensbasierten Systemen dar. Weiterführende Informationen finden sich z. B. bei KÜCHLIN & WEBER (2005).

Im Rahmen dieser Arbeit werden sowohl die regel- als auch fallbasierte Repräsentation verwendet. Daher wird für weitere Formen zur Wissensrepräsentation, welche im Hinblick auf die Zielstellung dieser Arbeit nicht von Relevanz sind, auf fortführende Fachliteratur, wie z. B. MERTENS (1990), PUPPE (1991) oder BEIERLE & KERN-ISBERNER (2008), verwiesen.

2.6.3 Knowledge Discovery in Databases

Der Prozess zur (semi-) automatischen Wissensextraktion aus Datenbanken wird nach FAYYAD ET AL. (1996b) als *Knowledge Discovery in Databases* bezeichnet. KDD stellt einen disziplinübergreifenden Ansatz aus Statistik, maschinellem Lernen und Datenbanksystemen dar, um implizite, bisher unbekannte Erkenntnisse zu erhalten. Häufig wird auch der Begriff *Data Mining* synonym verwendet. Allerdings ist das Data Mining vielmehr der Prozess der Datenanalyse selbst und Teil des KDD-Prozesses, welcher zudem die Vorverarbeitung der Daten beinhaltet (vgl. Abbildung 17).

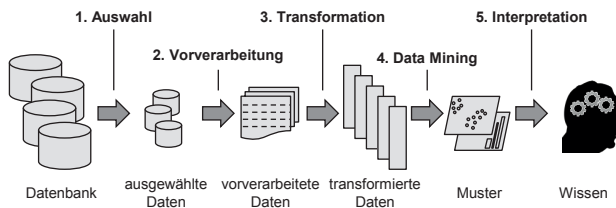


Abbildung 17: Schritte des KDD-Prozesses (nach FAYYAD ET AL. 1996b)

Zum KDD-Prozess zählen die fünf grundlegenden Schritte (ESTER & SANDER 2000):

1. *Auswahl:* Definition des Ziels des KDD-Prozesses aus Sicht der gegebenen Anwendungen sowie Festlegung der Daten zur Wissensextraktion.
2. *Vorverarbeitung:* Integration, Konsistentmachung sowie Vervollständigung der betrachteten Daten.

3. *Transformation*: Umwandlung der vorverarbeiteten Daten in eine hinsichtlich des Ziels des KDD-Prozesses geeignete Repräsentation.
4. *Data Mining*: Anwendung von effizienten Analyseverfahren zur Identifikation von gültigen Mustern.
5. *Interpretation*: Evaluierung der gefundenen Muster hinsichtlich der zuvor definierten Zielstellung.

Das dadurch erhaltene Wissen ist hierbei im statistischen Sinne gültig, bisher unbekannt und potentiell für weitere Anwendungen nützlich (ESTER & SANDER 2000).

Im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit wird im Folgenden der KDD-Schritt *Data Mining* vertieft betrachtet. Für die restlichen Schritte sei auf weiterführende Fachliteratur verwiesen (u. a. WITTEN & FRANK 2005, ESTER & SANDER 2000). Im Deutschen als *Datenmustererkennung* bezeichnet, wird Data Mining als Sammelbegriff für rechnergestützte Analyseverfahren verwendet (PIAZZA 2010). Darunter ist der nicht-triviale Prozess der Identifikation von in Datenbanken enthaltenen unbekanntem, gültigen, potentiell nützlichen und verständlichen Mustern mit Hilfe effizienter Algorithmen zu verstehen (FAYYAD ET AL. 1996a). Unter *Muster* wird hierbei eine beliebige Korrelation in den Daten bezeichnet, welche eine zusammenfassende Aussage über Einzelheiten in den Daten darstellt (HAGEDORN ET AL. 1997). Aufgrund der hohen Anzahl an Data Mining Methoden ist eine Systematisierung sowie Strukturierung dieser hinsichtlich des Anwendungsfalles von Relevanz. Eine Unterscheidung findet hierbei u. a. nach Methodengruppen des Forschungsgebietes, nach Ergebnissen, Beschreibungen oder Erklärungen sowie nach überwachten und unüberwachten Verfahren wie auch nach der zu erfüllenden Aufgabe statt. Da im Hinblick auf die Zielstellung dieser Arbeit ein konkreter Anwendungsbezug vorliegt, in dem durch Data Mining potentiell verschiedene Aufgaben zu erfüllen sind, ist die Strukturierung nach der *zu erfüllenden Aufgabe* naheliegend. Nach ALPAR & NIEDEREICHHOLZ (2000) sind dies die Aufgaben *Klassifikation*, *Segmentierung*, *Prognose*, *Abhängigkeitsanalyse* und *Abweichungsanalyse*. Diese werden in Abbildung 18 mit den ihnen zugeordneten Methoden dargestellt.

Die *Klassifikation* hat die automatisierte Zuordnung von Objekten anhand ihrer Attributwerte zu vorgegebene Klassen zum Ziel. Hierbei werden Zusammenhänge in der Datenbasis ermittelt, um die Zugehörigkeit der betrachteten Objekte zu einer Klasse zu beeinflussen. Dies stellt ebenfalls die Grundlage für die automatisierte Zuordnung von Objekten zu Klassen dar. Bei der *Segmentierung* erfolgt

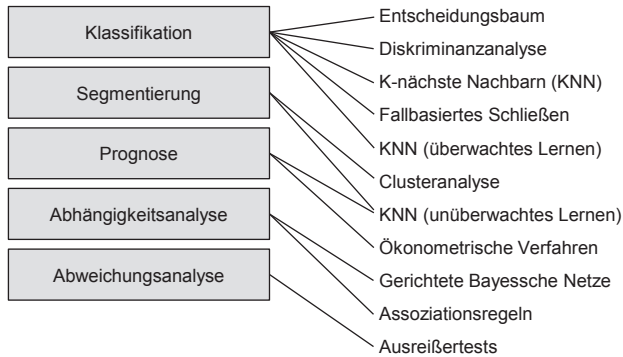


Abbildung 18: Aufgaben und Methoden des Data Mining (nach ALPAR & NIEDEREICHHOLZ 2000)

eine automatisierte Einteilung von Objekten anhand eines Ähnlichkeitskriteriums in verschiedene Gruppen (auch Cluster). Das Ziel ist hierbei, dass Objekte einer Gruppe möglichst ähnlich (Intrahomogenität) und Objekte unterschiedlicher Gruppen möglichst unähnlich (Intraheterogenität) sind. Die *Prognose* ist eine Vorhersage unbekannter Attributwerte auf Basis anderer Attribute oder von Werten des gleichen Attributs aus früheren Perioden. Bei der *Abhängigkeitsanalyse* erfolgt eine Ermittlung der Abhängigkeiten zwischen den Attributausprägungen der Objekte einer Datenbasis. Damit wird das Ziel verfolgt, zum einen Beziehungen zwischen gemeinsam auftretenden Attributen zu identifizieren und zum anderen diese zu beschreiben. Im Gegensatz zu den anderen Aufgaben findet hierbei keinerlei Zuordnung zu Klassen statt. Das Ziel der *Abweichungsanalyse* ist die Identifikation von Objekten, welche der Regelmäßigkeit anderer Objekte nicht folgen (sog. Ausreißer). Dies führt somit zur Entdeckung von Unregelmäßigkeiten (ALPAR & NIEDEREICHHOLZ 2000, PIAZZA 2010).

Neben dem von ALPAR & NIEDEREICHHOLZ (2000) beschriebenen Ansatz zur Systematisierung anhand der Aufgaben existieren noch weitere Ansätze in der Fachliteratur (u. a. FAYYAD ET AL. 1996b, SÄUBERLICH 2000, BEEKMANN & CHAMONI 2010). Im Rahmen der vorliegenden Arbeit finden die Klassifikation, die Segmentierung und die Prognose Anwendung.

2.7 Zusammenfassung und Fazit

Ausgehend von der dargelegten Problemstellung und der abgeleiteten Zielstellung in Kapitel 1 wurden innerhalb des vorliegenden Kapitels die Grundlagen für die weitere Arbeit betrachtet. Dabei wurde zu Beginn auf die Flexibilität und deren unterschiedliche Arten als das wichtigste Differenzierungsmerkmal neben der Produktqualität eingegangen sowie die Aufgaben und Ziele der Produktionsplanung und -steuerung dargestellt. Als eine bedeutende Voraussetzung für die effiziente Abwicklung von Produktionsaufträgen konnte des Weiteren der Produktionsfaktor Information herausgearbeitet werden und somit dem Daten- und Informationsmanagement in der auftragsbezogenen Produktion eine herausragende Rolle zugeteilt werden. Zudem wurden die Grundlagen von Kennzahlen sowie Kennzahlensystemen vorgestellt, welche zur Wiedergabe quantitativ messbarer Sachverhalte in einer aussagekräftigen, komprimierten Form herangezogen werden können. Abschließend wurde auf die technische Verarbeitung und unterschiedliche Repräsentationsformen von Wissen eingegangen. Zum einen wurden Funktionsweise und Aufbau von wissensbasierten Systemen beschrieben. Zum anderen konnte der KDD-Prozess zur Wissensextraktion aus Datenbanken als ein vielversprechender Ansatz identifiziert werden.

3 Stand der Forschung und Technik

3.1 Übersicht

Aufbauend auf der Ausgangssituation und Aufgabenstellung in Kapitel 1 sowie den in Kapitel 2 dargelegten Grundlagen wird im vorliegenden Kapitel der relevante Stand der Forschung und Technik diskutiert. Dies umfasst im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit die Diskussion von Ansätzen in den Bereichen *Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten* (vgl. Abschnitt 3.2), *Steigerung der Stammdatenqualität* (vgl. Abschnitt 3.3) und *Optimierung der Maschinenbelegung* (vgl. Abschnitt 3.4). Der daraus ableitbare Handlungsbedarf stellt gleichzeitig die Grundlage für das zu entwickelnde System dar (vgl. Abschnitt 3.5).

3.2 Ansätze zur Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten

Aufbauend auf den Grundlagen zur Betriebsdatenerfassung (vgl. Abschnitt 2.4.2) und im Hinblick auf die Zielstellung der vorliegenden Arbeit werden im Folgenden Forschungsansätze analysiert, die die Fähigkeit der Identifikation und der Datenspeicherung (Data-on-Tag) des intelligenten Produktes (Klasse 2) nutzen, um Informationen über spezifische Produktmerkmale dezentral aufzunehmen, mitzuführen und im weiteren Produktionsprozess zu verwenden. Die Produkte können folglich mit anderen realen Objekten kommunizieren und werden auf diese Art aktive Teilnehmer in Produktionsprozessen/ -abläufen. Durch die Integration von physischen Objekten in die Welt der Informationssysteme wird das sog. *Internet der Dinge*⁵ realisiert (BULLINGER & TEN HOMPEL 2007). In diesem Kontext verfolgen GÜNTNER & TEN HOMPEL (2010) die Zielsetzung, hochflexible selbstorganisierende logistische Systeme auf Basis von autonomen, selbststeuernden Objekten zu realisieren und somit das Internet der Dinge in der Intra-logistik umzusetzen. Betrachtet werden hierbei logistische Objekte (z. B. Transportbehälter), die neben der eindeutigen Identifikationsnummer weitere objektbezogene Daten (z. B. Transportziel, Inhalt oder Geometrie des Behälters) auf einem RFID-Transponder mitführen. Hierzu wird eine intelligente Infrastrukt-

⁵ Unter dem *Internet der Dinge* ist die Vision zu verstehen, in der das Internet Teil der physischen Welt wird und in der ebenso jeder reale Gegenstand ein Teil des Internets werden kann. Dies ermöglicht es, Gegenstände direkt oder indirekt mit Informationen zu versorgen oder diese als physische Zugangspunkte zu Internet-Services zu nutzen (GÜNTNER & TEN HOMPEL 2010).

tur entwickelt, welche sich mit den logistischen Objekten abstimmt und somit ein dezentrales, kooperatives und beliebig veränderbares Transportnetzwerk realisiert.

Mit dem Fokus auf die überbetriebliche Logistik werden im *Sonderforschungsbereich (SFB) 637 Selbststeuerung logistischer Prozesse – Ein Paradigmenwechsel und seine Grenzen* die Erforschung und Nutzbarmachung der Selbststeuerung adressiert. Unter Selbststeuerung wird in diesem Kontext die dezentrale Steuerung autonomer logistischer Objekte in einer heterarchischen Organisationsstruktur verstanden (SCHOLZ-REITER ET AL. 2004). Intelligente Objekte führen zu diesem Zweck neben Informationen bzgl. ihrer Identität auch Daten hinsichtlich Reihenfolge, Anzahl und Art der Bearbeitungsschritte des Werkstücks sowie über die Auftragsituation mit sich, um autonom auf Störungen oder kurzfristige Änderung der Auftragslage reagieren zu können. Betrachtungsgegenstände sind u. a. der Einsatz von Multi-Agenten-Systemen zur Realisierung einer autonomen Logistiksteuerung (SCHULDT 2011) sowie autonome Sensorsysteme in der Transport- und Lebensmittellogistik (JEDERMANN 2009).

Innerhalb des Verbundprojektes *RAN – RFID-based Automotive Network*, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), wird vornehmlich die Planung und Steuerung überbetrieblicher Prozesse in einem Wertschöpfungsnetzwerk betrachtet. Durch eine gezielte Verteilung des Steuerungsaufwandes auf zentrale und dezentrale Elemente in Form einer hybriden Steuerung kann zum einen die Transparenz im gesamten Netzwerk erhöht und zum anderen die Komplexität beherrschbar gemacht werden. In diesem Kontext wird unter einer RFID-basierten hybriden Steuerungsarchitektur ein kombiniertes Datenmanagement verstanden, bei dem produktspezifische Informationen (z. B. Qualitätsdaten) dezentral für die direkte Kommunikation mit Maschinen am Produkt mitgeführt und auftragspezifische Informationen (z. B. Auftragsstatus) zentral in unternehmensinternen Datenbanken eines sog. Infobrokers hinterlegt werden. Eine zentrale Infrastruktur ermöglicht die gezielte Adressierung der entsprechenden Datenbanken (Repositories) und den standardisierten, überbetrieblichen Austausch der zentral gespeicherten auftragsrelevanten Daten. Die RFID-Technologie wird in diesem Kontext für zwei Aspekte eingesetzt. Zum einen für die Erzeugung von echtzeitnahen Ereignisdaten und zum anderen für die dezentrale Speicherung von produktspezifischen Daten. Auf diese Weise wird eine Optimierung und adaptive Planung der Wertschöpfungskette durch die Weitergabe auftragspezifischer Informationen mit Hilfe des Infobrokers ermöglicht. Des

Weiteren erfolgt durch die auf dem Produkt gespeicherten Daten eine adaptive Steuerung von Produktionsprozessen (REINHART ET AL. 2011a).

Überdies finden sich bei mehreren Autoren (u. a. MCFARLANE ET AL. 2003, POON ET AL. 2007, HUANG ET AL. 2008, ZAEH & OSTGATHE 2009, OSTGATHE 2012) Anwendungen der RFID-Technologie zur Steuerung der innerbetrieblichen Produktionsabläufe. Exemplarisch sei hier die Arbeit von OSTGATHE (2012) erwähnt. Darin wird ein System beschrieben, welches das Produkt als zusätzliches Element zur Produktionssteuerung durch den Einsatz der RFID-Technologie qualifiziert. Mit Hilfe eines speziell entwickelten Datenmodells wird auf dem Transponder der Ablaufplan des Produktes mitgeführt, welcher als Petri-Netz modelliert ist. Dieses besteht aus drei unterschiedlichen Bausteinarten (Organisation, Verfahren, Dokumentation). Je nach Abschluss eines Bearbeitungsschrittes wird der entsprechende Produktionsprozess dokumentiert (u. a. Produktstatus, Bearbeitungsdauer) und der nächste Arbeitsvorgang damit freigegeben. Die im Rahmen der Produkterstellung aufgenommenen Betriebsdaten dienen lediglich zu Dokumentationszwecken und werden keiner weiteren Verarbeitung bzw. Anwendung zugeführt.

Weitere Arbeiten (u. a. LEE & PARK 2008, SHI ET AL. 2012) beschäftigen sich mit dem Thema des Tracking und Tracing mit Hilfe der RFID-Technologie. Allerdings ist allen Ansätzen gleich, dass durch den RFID-Transponder ein Event generiert wird (z. B. Electronic Product Code Information Service (EPCIS)), welches für die Rückverfolgbarkeit auf entsprechenden Servern abgerufen werden kann. Anwendungen, welche ausschließlich den RFID-Transponder als zentrales Datenhaltungsobjekt für das Tracking und Tracing nutzen, sind nicht bekannt. Des Weiteren sind über den Einsatz von RFID zur Verfolgung von Objekten in der VDA-Empfehlung 5501 und der VDA-Empfehlung 5510 Vorschläge für die Automobilindustrie dargestellt. Die Anforderungen an RFID-Systeme zum Einsatz in der Supply Chain werden z. B. in der VDI-Richtlinie 4472 Blatt 4 beschrieben.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes *SemProM – Semantic Product Memory* wird ein digitales Produktgedächtnis entwickelt (STEPHAN ET AL. 2010). Gemäß dem Sinne des Internets der Dinge werden Produkte dahingehend befähigt, Bestands- und Betriebsdaten in einer individuellen Produktinstanz zu erfassen sowie diese mit der Umgebung auszutauschen. Überdies ermöglichen die mitgeführten Daten die dezentrale Steuerung von Produktionsprozessen und Prüfvorgängen. In diesem

Kontext ist ein Containerformat entstanden, um die Produktdaten auf dem Transponder strukturiert zu speichern und dieses mit semantischen Technologien zu verknüpfen. Im Rahmen des Projektes wurden nicht nur die Produktion und Logistik, sondern auch die Bereiche Wartung, Handel und Endverbraucher betrachtet. Die Ergebnisse von SemProM fließen in die Projekte *ADiWa – Allianz Digitaler Warenfluss* (SCHIEF ET AL. 2011) und *Aletheia – Semantische Föderation umfassender Produktinformationen* (WAUER ET AL. 2009) ein. In beiden Projekten liegt der Fokus auf der Nutzung der Informationen aus dem Internet der Dinge, um neues Wissen zu generieren und damit Geschäftsprozesse zu verbessern.

Weitere Vorschläge zur Strukturierung der Daten auf dem RFID-Transponder finden sich u. a. bei den internationalen Standardisierungsorganisationen ISO und GS1. Dies sind zum einen die Normen ISO/IEC 15961-1:2013 und ISO/TS 8000-1:2011, welche Datenprotokolle zum Austausch von Informationen in RFID-Systemen sowie die Abbildung der Daten auf den Transpondern wie auch deren Verarbeitung beschreiben. Zum anderen ist mit dem Electronic Product Code (EPC) Tag Data Standard (GLOBAL STANDARDS ONE (GS1) 2011) eine international verwendete überschneidungsfreie Ziffernfolge zur eindeutigen Kennzeichnung von logistischen Objekten (u. a. Produkte, Ladungsträger) definiert, welche zudem die Möglichkeit bietet, produktspezifische Informationen auf dem Transponder mitzuführen. Generell gilt es allerdings zu berücksichtigen, dass für die Speicherung spezifischer Daten der User-Memory (Memory Bank 11) verwendet wird. Nachteilig ist hier die Tatsache zu nennen, dass ein Auslesen, Löschen oder Verändern dieser Daten durch den Einsatz von konventioneller RFID-Technik möglich ist. Eine Berücksichtigung von Sicherheitskonzepten findet in der vorliegenden Arbeit nicht statt. Daher sei an dieser Stelle für weiterführende Informationen auf einschlägige Fachliteratur (z. B. FINKENZELLER 2006) verwiesen.

Ein weiterer Ansatz, um Informationen über den spezifischen Entstehungsprozess auf dem Produkt mitzuführen, wird im Rahmen des *SFB 653 Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus* betrachtet. Zu diesem Zweck werden Forschungsarbeiten durchgeführt, die eine inhärente Speicherung und Erfassung diskreter Bauteildaten in der Bauteilrandzone sowie zur Aufnahme, Speicherung und Erfassung der Belastungshistorie zum Ziel haben. Der grundlegende Unterschied zu den im Vorfeld dargestellten Ansätzen liegt in der Verwendung des Werkstoffes selbst zur Einbringung von Informationen im Gegensatz zur Nutzung einer weiteren Technologie, wie z. B. RFID. In diesem Rahmen wird ein Verfahren zur

magnetischen Speicherung von Daten auf der Oberfläche von Bauteilen erarbeitet (DENKENA 2007).

Zwischenfazit

Im vorliegenden Abschnitt wurden Forschungsarbeiten zum Einsatz intelligenter Produkte in Produktion und Logistik dargestellt. Hierbei wurden sowohl unternehmensinterne wie auch -übergreifende Ansätze betrachtet und diese hinsichtlich der auf dem intelligenten Produkt mitgeführten Daten untersucht. Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das Potential zur Aufnahme und dem Mitführen von spezifischen produktbezogenen Daten mit Hilfe von intelligenten Produkten von zahlreichen Autoren bereits beschrieben und zum Teil auch in ersten Anwendungen umgesetzt wurde. Allerdings beziehen sich die Ansätze vornehmlich auf das Mitführen von Daten, welche spezifische Ausprägungen von Produkten (z. B. Qualitätsdaten) berücksichtigen, die u. a. für Zwecke der Produktionssteuerung Einsatz finden. Gerade auch vor dem Hintergrund eines sich ständig wandelnden Produktionsumfeldes, wie es bei der Werkstattfertigung vorliegt, konnte das Produkt selbst als zentrales Element der Produktion und damit auch der Betriebsdatenerfassung identifiziert werden. Forschungsbedarf lässt sich folglich für die Verwendung der Fähigkeiten der Identifikation und Datenhaltung des intelligenten Produktes zur Offline-Betriebsdatenerfassung ableiten. Gerade auch aufgrund der begrenzten Speichergröße des RFID-Transponders sind eine geeignete Datenhaltung sowie eine entsprechende Weiterverarbeitung der produktspezifischen Auftragsdaten zu einem ganzheitlichen Wissen über die Produktion erforderlich.

3.3 Ansätze zur Steigerung der Stammdatenqualität

Die Sicherstellung bzw. Maximierung der Stammdatenqualität wird vom sog. *Stammdatenmanagement* realisiert (SMITH & MCKEEN 2008, LOSHIN 2009). Von zahlreichen Autoren (u. a. SMITH & MCKEEN 2008, LOSHIN 2009, HILDEBRAND ET AL. 2011b, SCHEUCH ET AL. 2012, SPATH ET AL. 2012b) wird herausgestellt, dass das Stammdatenmanagement eine Unternehmensfunktion und keine reine Softwarefunktion darstellt und einen hohen organisatorischen wie auch technischen Aufwand erfordert (KRCMAR 2010). Wichtige Aspekte sind zudem die Art der Datenhaltung (zentral, dezentral, hybrid) wie auch die hierzu notwendigen Architekturen (SPATH & WEISBECKER 2009). Normalerweise umfasst das Stammdatenmanagement die Elemente *Identifikation*, *Konsolidierung*, *Harmonisierung* und *Integration der Stammdaten* wie auch die darauffolgende *Synchroni-*

sation der Daten (LOSHIN 2009, KRCCMAR 2010). Im Hinblick auf die Zielstellung der Arbeit werden im Folgenden dieses Abschnitts Ansätze analysiert, die das Stammdatenmanagement im Bereich der Produktion und Logistik betrachten. Dies beinhaltet vornehmlich Ansätze, die ein Management von Fertigungsstammdaten zum Ziel haben.

Das vom BMWi geförderte Forschungsprojekt *STAIRS – Stammdatenmanagement wertorientiert gestalten* hat die Erforschung der Nutzentransparenz des Stammdatenmanagements zum Ziel. Durch die Identifikation der Wirkungszusammenhänge zwischen Gestaltungsfeldern, Datenqualität und Geschäftsprozessen soll es Unternehmen damit ermöglicht werden, das für den spezifischen Fall wirtschaftlichste Stammdatenmanagement-Konzept auswählen zu können. Dies erfolgt durch das Aufzeigen von qualitätsbedingten Problemen und Handlungsfeldern, die transparente Erklärung des Nutzens von qualitativ hochwertigen Stammdaten und die Simulation der Wirkung des Stammdatenmanagements (SCHEIBMAYER ET AL. 2012).

HINRICHS (2002) beschäftigt sich mit der qualitätsgelenkten Datenintegration in Verbindung mit dem Data Warehousing und stellt hierzu ein 10-phasiges Vorgehensmodell vor. Dieses basiert auf den Anforderungen der DIN EN ISO 9001:2000. Es bildet damit die methodische Grundlage für hochgradig automatisierte, reproduzierbare und wartbare Integrationsprozesse mit qualitätsgesicherten Ergebnissen. In diesem Kontext wurden zur Messung der Datenqualität u. a. Metriken für verschiedene Datenqualitätsmerkmale definiert und durch Messverfahren validiert.

Zur Identifikation des Handlungsbedarfs hinsichtlich Stammdatenanpassungen werden häufig Data Mining Methoden (vgl. Abschnitt 2.6.3) eingesetzt. So werden im Projekt *ProDaMi – Entscheidungsunterstützung im Produktionsumfeld mit Data Mining Werkzeugen* mit Hilfe von u. a. Ausreißer- und Clusteranalysen fehlende oder fehlerhafte Stammdaten erkannt und dementsprechend aktualisiert. Betrachtet werden hier u. a. die Bearbeitungs- und Übergangszeit wie auch die technologische Folge von Aufträgen. Die Grundlage der Analyse bilden Betriebsdaten, welche von konventionellen BDE-Systemen stammen. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass die Aktualisierung der Stammdaten zu Produktionsplänen mit einem höherem Übereinstimmungsgrad mit der Realität führen (DIMITROV ET AL. 2010).

In der Arbeit von GRÖGER ET AL. (2012) wird ebenfalls ein auf Data Mining Methoden basierender Ansatz vorgestellt. Hier liegt der Fokus auf der Realisierung einer sog. Advanced Manufacturing Analytics Plattform für die datengetriebene Optimierung von Fertigungsprozessen. Ziel ist hierbei die Entwicklung eines ganzheitlichen prozessbezogenen Data Warehouse, welches operative und prozessbezogene Fertigungsdaten integriert und die Grundlage für verschiedenste Analysen bildet. Darauf aufbauend werden Data Mining Methoden für spezifische Anwendungsfälle (z. B. Ursache-Analysen von Produktionsfehlern) definiert, um auch implizite Muster in den Fertigungsdaten zu identifizieren. Die Analyseergebnisse werden dann über einen datenbankbasierten Wissensmanagementansatz gespeichert und weiteren Anwendern zur Verfügung gestellt. Betrachtet werden Daten, die sich auf den gesamten Auftragsabwicklungsprozess, beginnend bei der Erstellung des Produktionsauftrages bis hin zum fertigen Produkt, beziehen.

Hinsichtlich der Anwendungen von Data Mining Methoden im Bereich der Produktion findet sich ein guter Überblick bei HARDING ET AL. (2006) und CHOUDHARY ET AL. (2009). Grundsätzlich lassen sie sich den Anwendungsfeldern Produktqualitätsanalysen unter Berücksichtigung von Bearbeitungsparametern (u. a. OH ET AL. 2001, SKORMIN ET AL. 2002), Fehleranalysen von Produktionssystemen (u. a. CHEN ET AL. 2005, SHEN ET AL. 2000), Instandhaltungsanalysen (u. a. BATANOV ET AL. 1993, ROMANOWSKI & NAGI 2001), Planungsqualitätsanalysen (u. a. BELZ & MERTENS 1996, SRINIVAS ET AL. 2004) und Betriebsdatenanalysen (u. a. DIMITROV ET AL. 2010, GRÖGER ET AL. 2012) zuordnen. Hierbei lässt sich festhalten, dass die Methoden des Data Minings einen ausreichenden Reifegrad aufweisen, was durch den erfolgreichen Einsatz dieser in verschiedensten, die Produktion betreffenden Anwendungen, unterstrichen wird.

Zwischenfazit

In diesem Abschnitt wurde die Qualität von Fertigungsstammdaten als ein zentraler Faktor für die Produktionsplanung und -steuerung herausgearbeitet. Zur Bewertung der Informationsqualität existieren bereits zahlreiche Ansätze, welche noch an die spezifischen Anforderungen von Fertigungsstammdaten angepasst werden müssen. Zur Identifikation von notwendigen Stammdatenanpassungen stellen die Methoden des Data Minings ein vielversprechendes Werkzeug dar, durch die sowohl explizites wie auch implizites Wissen über die Produktionsprozesse auf Basis von Betriebsdaten generiert werden können. Die Rückführung

dieses Wissens in die Stammdaten und die damit verbundene Verfügbarmachung für Planungszwecke wurde bislang noch in keinem integrierten Prozess umgesetzt. Hierfür müssen zum einen Methoden des Data Minings ausgewählt und an die spezifischen Rahmenbedingungen im Bereich der Werkstattfertigung angepasst werden, um sowohl produktionszustands- als auch auftragsfolgeabhängige Abweichungen zwischen Plan- und Ist-Werten zu identifizieren. Dies erfordert zum anderen die Schaffung einer dynamischen Stammdatenbasis, welche sich selbstständig auf Basis der Abweichungen aktualisiert und im Prozess der Maschinenbelegung verwendet werden kann. Zudem ist es erforderlich, implizite Zusammenhänge zwischen produktionszustands- und auftragsfolgebezogenen Attributen im Prozess der Maschinenbelegung zu berücksichtigen und daher auch geeignet bereitzustellen.

3.4 Ansätze zur Optimierung der Maschinenbelegung

Im Folgenden werden Forschungsansätze diskutiert, welche eine Optimierung der Maschinenbelegung zum Ziel haben. Hierbei wird unter dem Terminus *Optimierung* die Verbesserung eines bestehenden Belegungsplanes verstanden, welcher im Hinblick auf das Zielsystem der PPS (vgl. Abschnitt 2.3.2) zu einem höheren Erfüllungsgrad führt.

SCHMOLLING (1997) beschreibt in seiner Arbeit einen ganzheitlichen Ansatz zum betriebsdatengestützten PPS-Controlling für die durchlaufzeitorientierte Grobplanung in der Einzel- und Kleinserienfertigung. Im Rahmen der Arbeit ist ein Instrumentarium entstanden, um den Einfluss von Planungsparametern auf die Auftragsdurchlaufzeit zu quantifizieren. Auf Basis einer Eingrenzung auf Parameter, welche für die Grobplanung relevant sind, wird Anwendern die Möglichkeit gegeben, durch eine Variation dieser die Durchlaufzeiten einzelner Aufträge zu beeinflussen. Somit ist eine Anpassung von Material- und Kapazitätsbedarfsterminen an die marktseitigen Forderungen möglich.

JÄGER (2000) beschreibt in seiner Arbeit eine kennliniengestützte Konfiguration der wesentlichen PPS-Parameter von standardisierten ERP-Systemen. Durch die Anpassung der planungs- und dispositionsrelevanten Parameter im Bereich der PPS wird das Ziel verfolgt, eine Steigerung der Effizienz von Prozessabläufen zu erreichen. Hierbei konnte nachgewiesen werden, dass die Planungsgüte durch eine derartige Parameteranpassung erhöht werden kann. Allerdings ist ein konti-

nuierliches Controlling der Ergebnisgrößen wie auch der betrachteten PPS-Parameter unerlässlich für eine nachhaltige Optimierung.

Im Rahmen des Projektes *ProSense – Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme und intelligenter Sensorik* wird das Ziel verfolgt, auf Basis einer modularen IT-Struktur, welche hochauflösende, echtzeitfähige Produktionsdaten zur Entscheidungsunterstützung des Mitarbeiters verarbeiten und visualisieren kann, eine höhere Zielerfüllung, z. B. Liefertreue, zu realisieren. Zu diesem Zweck werden durch den Einsatz intelligenter Sensorik aktuelle Daten in der Produktionsebene aufgenommen und mit Hilfe von speziellen Simulationsmodellen sichere Prognosen über zukünftige Produktionsabläufe erstellt. Eine kontinuierliche Aktualisierung dieser Modelle an die vorliegende Situation in der Produktionsebene ist essentiell, um auch fortlaufend zu einer besseren Zielerreichung beizutragen. Die Aktualisierung des Simulationsmodells erfolgt unter Berücksichtigung von zuvor mit Hilfe von Data Mining Methoden identifizierten Mustern in den hochauflösenden Daten. Die Simulationsläufe finden demnach auf einem angepasstem Stammdatensatz statt (SCHUH ET AL. 2013a, SCHUH ET AL. 2013b).

Das Projekt *CyProS – Cyber-Physische Produktionssysteme* versucht hingegen, durch den Einsatz sog. Cyber-Physischer Produktionssysteme (CPPS), die Komplexität des sich verschärfenden Wettbewerbs zu beherrschen sowie eine signifikante Steigerung der Produktivität und Flexibilität produzierender Unternehmen zu erreichen. Neben der Entwicklung einer einheitlichen Referenzarchitektur, welche eine Adhoc-Vernetzung der einzelnen CPPS ermöglicht, ist es zudem ein erklärtes Ziel, eine sich kontinuierlich aktualisierende Planungsdatenbasis zu schaffen. Diese stellt die Grundlage dar, um auf Basis der aktuellen Zustände von Produkten und Ressourcen in Echtzeit Planungs- und Steuerungsentscheidungen zu treffen. Besonderer Fokus liegt demnach auf der Verfügbarmachung relevanter Informationen der CPPS für die Optimierung der Auftragsabwicklung (REINHART ET AL. 2013).

Innerhalb des Forschungsprojektes *WInD – Wandlungsfähige Produktionssysteme durch integrierte IT-Strukturen und dezentrale Produktionsplanung und -regelung* wird auf der einen Seite das Ziel verfolgt, die Integrationsfähigkeit bestehender IT-Planungssysteme innerhalb von Unternehmen sowie über Unternehmensgrenzen hinweg durch die Definition von Standardschnittstellen wie auch der Steigerung der Datenqualität der Auftragsdaten zu realisieren. Auf der anderen Seite werden kybernetische Planungsverfahren entwickelt, welche auf

Echtzeitdaten aus der Produktion basieren und eine dezentrale PPS ermöglichen. Hierzu werden echtzeitdatenverarbeitende Regelkreise entwickelt, welche auf dem Viable-Systems-Model als Ordnungsrahmen einer wandlungsfähigen PPS basieren (SCHUH ET AL. 2013c).

In der Literatur finden sich zudem zahlreiche Ansätze (u. a. MOSER 1993, ZETLMAYER 1994, PETERMANN 1996, BREITHAUPT 2001, REMPP 2003, BRINZER 2005, MÜLLER 2006, BURKHALTER 2010), welche auf der Funktionsweise eines regelungstechnischen Systems basieren. Stellvertretend wird folgend der Ansatz von BRINZER (2005) vorgestellt. Darin wird eine Produktionsregelung für die wandlungsfähige variantenreiche Serienfertigung vorgestellt. Hierbei erfolgt eine Unterteilung in globale (Produktionsbereich) und lokale (Produktionssystem) Regelkreise, welche über eine ausreichende Autonomie zur Belegungsentscheidung verfügen. Mit diesem Konzept konnten Stabilität und Robustheit bezüglich Änderungen des Auftragsprofils und der Auftragslast nachgewiesen werden.

NEIDHARDT (2007) behandelt in ihrer Arbeit die Fragestellung hinsichtlich des Einsatzes von Prioritätsregeln in der Maschinenbelegungsplanung für den Bereich der Werkstattfertigung zur Erreichung ökonomischer Zielstellungen. Darin werden im Speziellen die Einflussfaktoren auf die Prioritätsregeln untersucht und deren Wirkung auf den zielorientierten Einsatz bewertet.

Zwischenfazit

Im vorliegenden Kapitel wurde im Speziellen auf Ansätze eingegangen, welche eine Optimierung der Maschinenbelegung zum Ziel haben. Dabei konnte zum einen die Anpassung der Terminierungsparameter als ein entscheidender Stellhebel im Planungsprozess zur Realisierung einer besseren Zielerreichung identifiziert werden. Zum anderen wurde deutlich, dass nur eine kontinuierliche Adaptation der verwendeten Modelle an die aktuelle Situation in der Produktionsebene zu zufriedenstellenden Planungsergebnissen führt. Der hieraus ableitbare Forschungsbedarf im Bereich der Maschinenbelegungsplanung lässt sich somit hauptsächlich für die Aktualität der der Planung zugrunde liegenden Modelle wie auch die korrekte Anpassung der Terminierungsparameter während des Planungsprozesses ableiten. Zudem sind die eingesetzten Verfahren zur Maschinenbelegung von größter Bedeutung für die Qualität des erzeugten Belegungsplanes und daher entsprechend des Verwendungszweckes auszuwählen.

3.5 Fazit und resultierender Handlungsbedarf

Aus der beschriebenen Ausgangssituation und Problembeschreibung in Kapitel 1 sowie den in Kapitel 2 dargelegten Grundlagen wie auch dem im vorliegenden Kapitel analysierten Stand der Forschung und Technik wird ersichtlich, dass in der auftragsbezogenen Produktion erhöhte Anforderungen an PPS-Systeme aufgrund des individuellen Ablaufs von Produktionsaufträgen und den dafür erforderlichen Flexibilitätsbedarfen vorliegen. Im Gegensatz zur anonymen Serien- und Massenfertigung bestehen bei der hier betrachteten kundennahen Einzel- und Kleinserienfertigung, durch die hohe Anzahl an Produktvarianten und die deutlich komplexeren Materialflüsse, auch Abhängigkeiten, welche aus dem Zustand der Produktion bei Durchführung der Arbeitsaufgabe resultieren. Insbesondere die durch den Kunden induzierten und sich ständig wandelnden Produktausprägungen sowie die daraus resultierenden Änderungen der Auftragsvorgänge und -abläufe erfordern somit eine individuelle Planung und Steuerung von Produktionsaufträgen, um ebenfalls eine hohe Liefer- und Termintreue zu erreichen. Im Rahmen der Analyse des Standes der Forschung und Technik konnte herausgestellt werden, dass dies durch die Adaption der Terminierungsparameter in PPS-Systemen erreicht werden kann. Eine Betrachtung auf Ebene der einzelnen DLZ-Anteil-Arten sowie die individuelle Berücksichtigung von produktionszustands- wie auch auftragsfolgebezogenen Abhängigkeiten bei der Anpassung von deren Durchführungsdauer wurden bisher nicht untersucht. Zudem konnte gezeigt werden, dass die Qualität der Stammdaten von höchster Bedeutung für realistische Maschinenbelegungspläne ist. Beruhen die Stammdaten auf Ist-Daten, haben diese nur Gültigkeit, wenn auch weiterhin die gleichen Bedingungen zum Zeitpunkt der Datenaufnahme vorliegen. Ändern sich allerdings diese Bedingungen, führt dies zu veralteten Stammdaten und dies wiederum zu unrealistischen Produktionsplänen. Zur Aktualisierung der Stammdaten wurden bereits erfolgreich Data Mining Methoden eingesetzt. Forschungsbedarf wurde für einen integrierten Prozess identifiziert, welcher zu einer kontinuierlich aktualisierenden dynamischen Stammdatenbasis führt und hierzu Data Mining Methoden nutzt. Des Weiteren konnte zur Realisierung einer skalierbaren wie auch ganzheitlichen Erfassung der individuellen Auftragsdaten die Offline-Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten für den Bereich der Werkstattfertigung als forschungsrelevant herausgearbeitet werden.

Folglich besteht Handlungsbedarf zur Entwicklung eines PPS-Systems für die auftragsbezogene Produktion, welches die folgenden allgemeinen und spezifischen Anforderungen erfüllt.

Allgemeine Anforderungen

- *Beherrschung eines ständig wechselnden Produktionsprogrammes:*
PPS-Systeme, welche in der auftragsbezogenen Produktion eingesetzt werden, müssen ein ausreichendes Maß an Flexibilität hinsichtlich Produkt, Durchlauf und Prozess (vgl. Kapitel 2.2.3) aufweisen. Dies ist bedingt durch die Handhabung eines sich ständig ändernden Produktionsprogramms, welches durch neue Produkte wie auch variierende Produktausprägungen bestehender Produkte gekennzeichnet ist. Aufgrund der Betrachtung einer Werkstattfertigung und der damit einhergehenden Möglichkeit, Produkte auf unterschiedlichen Wegen (z. B. alternatives Betriebsmittel, andere Technologie) herzustellen, muss dies bei der Belegungsplanung bereits berücksichtigt werden. Hier sind im Speziellen individuelle Fertigungsvorgänge zu beachten, welche zum einen von den zur Verfügung stehenden Betriebsmitteln und zum anderen von deren jeweiliger Konfiguration (Zustand, Parameter) abhängen.
- *Anwendbarkeit in sich verändernden Produktionsumgebungen:*
Ein wesentliches Erfordernis zur Anwendung des PPS-Systems in der Werkstattfertigung ist die Realisierung einer hohen Adaptivität. Aufgrund der kontinuierlichen Veränderung der Arbeitsvorgänge und -abläufe sowie des Produktionsbereiches (z. B. Austausch eines Betriebsmittels) ist daher eine aufwandsarme Integration, aber auch Erweiterbarkeit durch eine entsprechende Gestaltung des PPS-Systems zu gewährleisten.

Spezifische Anforderungen

- *Ganzheitliche automatisierte Aufnahme von Auftragsdaten:*
Aufgrund der Tatsache, dass sich die Produktionsebene einer Werkstattfertigung häufig verändert, ist es erforderlich, eine technische Lösung zu verwenden, welche eine hohe Skalierbarkeit aufweist und zudem eine ganzheitliche Aufnahme der Auftragsdaten ermöglicht. Zu diesem Zweck sollen intelligente Produkte sowie ein entsprechend geartetes Sensornetzwerk verwendet werden.
- *Bewertung und Prognose des Produktionszustandes:*
Der Produktionszustand beschreibt die Situation in der Produktion zum Zeitpunkt der Durchführung des betrachteten DLZ-Anteils. Zu dessen Bewertung auf Basis von Ist-Daten als auch zur Prognose auf Basis von Plan-Daten ist eine einheitliche Beschreibung erforderlich. Die Grundlage zur Bewertung des Produktionszustandes stellen die mit dem intelligenten Produkt aufnehmbaren Zeitintervalle dar.

- *Dynamische Stammdatenbasis:*
Gerade die Werkstattfertigung ist geprägt durch ein wechselndes Produktionsprogramm. Demnach haben Stammdaten, welche auf Ist-Daten basieren, nur sehr kurze Gültigkeitsdauern. Demnach ist es erforderlich, zum einen eine sich kontinuierlich aktualisierende Stammdatenbasis zu verwenden. Hierbei stellt die Berücksichtigung von Datenunsicherheiten in den vorliegenden Ist-Daten ein wesentliches Erfolgskriterium dar. Zum anderen ist ein Vorgehen zu realisieren, um Terminierungsparameter entsprechend des zu erwartenden Produktionszustandes festzulegen, so dass diese zum Zeitpunkt der Durchführung gültig sind.
- *Berücksichtigung von produktionszustands- und auftragsfolgebezogenen Abhängigkeiten bei der Maschinenbelegungsplanung:*
Die Produktionsprozesse sind abhängig von einer Vielzahl von Einflussgrößen, welche sich häufig auch untereinander beeinflussen. Dabei haben sowohl der Produktionszustand als auch die Auftragsfolge einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Produktionsprozesse. Es ist somit erforderlich, die implizit vorliegenden Abhängigkeiten in den Auftragsdaten zu identifizieren und als sog. Produktionswissen für die Maschinenbelegungsplanung nutzbar zu machen. Dies führt zur Forderung nach DLZ-Anteil-individuellen Terminierungsparametern, welche sich in Folge des Produktionswissens adaptieren lassen.
- *Algorithmus zur Maschinenbelegungsplanung mit einer dynamischen Stammdatenbasis:*
Es ist ein spezieller Algorithmus für die Maschinenbelegung erforderlich, der sowohl mit einer sich aktualisierenden Stammdatenbasis als auch mit produktionszustands- als auch auftragsfolgeabhängigen Planungsparametern umgehen kann.
- *Integrierter KDD-Prozess:*
Zum effizienten Einsatz des PPS-Systems sind die oben genannten Anforderungen in einem integrierten Prozess umzusetzen. Demnach ist der in Abschnitt 2.6.3 vorgestellte KDD-Prozess zur Wissensextraktion in einer geeigneten Art und Weise in das PPS-System einzubetten.
- *Durchgängig nutzbares Datenmodell:*
Aufgrund der Tatsache, dass enorm große Datenmengen gehandhabt werden, ist ein Datenmodell erforderlich, welches von der Betriebsdatenaufnahme bis hin zur Maschinenbelegungsplanung verwendbar ist. Die strukturierte und redundanzfreie Datenhaltung ist somit ein wichtiges Kriterium für das PPS-System.

4 Übersicht über das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

Im vorliegenden Kapitel wird das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung beschrieben, welches die in Abschnitt 3.5 abgeleiteten Anforderungen an ein PPS-System für die auftragsbezogene Produktion erfüllt. Im entwickelten System ist der in Abschnitt 2.6.3 vorgestellte KDD-Prozess abgebildet und für die Anwendung in einem integrierten Prozess angepasst. Dies betrifft die Aufnahme der Betriebsdaten mit dem intelligenten Produkt, die Ergänzung um produktionszustandsbeschreibende Attribute sowie die Transformation in eine für die Analyse geeignete Form. Darauf aufbauend werden die Vorgehen sowohl zur Bereitstellung der aktualisierten Stammdaten als auch die Ableitung des Produktionswissens durch ausgewählte Data Mining Methoden dargestellt, so dass diese im Rahmen der Maschinenbelegungsplanung verwendet werden können. Eine Übersicht der einzelnen Elemente des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung ist in Abbildung 19 dargestellt. Diese sind die *Produktspezifischen Auftragsdaten*, das *Offline-Betriebsdatenerfassungssystem mit intelligenten Produkten*, das *Auftragsdaten-Analysesystem* sowie das *Wissensbasierte Planungssystem*.

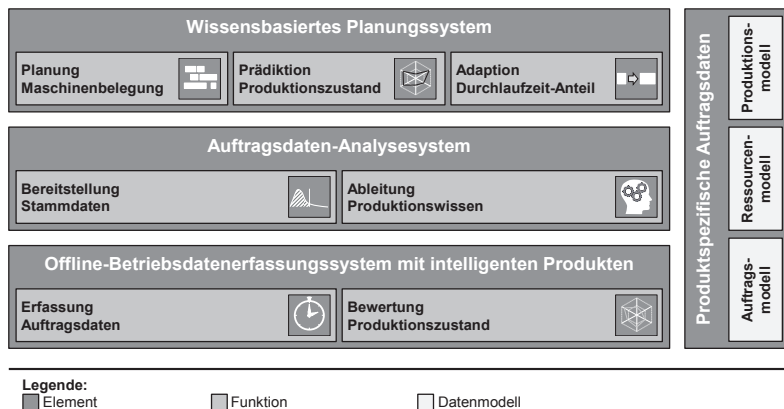


Abbildung 19: Übersicht über das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

Die einzelnen Elemente werden jeweils durch Funktionen bzw. Datenmodelle repräsentiert. Im Folgenden werden die Elemente des Systems zur wissensbasier-

ten Maschinenbelegungsplanung kurz erläutert. Eine ausführliche Beschreibung der Funktionen und Datenmodelle erfolgt in den Kapiteln 5 und 6.

Produktspezifische Auftragsdaten

Die produktspezifischen Auftragsdaten haben die Aufgabe, alle Daten für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung strukturiert zu verwalten und ermöglichen somit eine durchgängige Verwendung von der Betriebsdatenaufnahme über deren Analyse bis hin zu Planungstätigkeiten. Sie bestehen aus drei Teilmustern. Das *Auftragsmodell* dient der Modellierung von Produktionsaufträgen und des spezifischen Entstehungsprozesses von Produkten. Mit Hilfe des *Ressourcenmodells* lassen sich Fähigkeiten und die Konfiguration von Betriebsmitteln beschreiben. Das *Produktionsmodell* ermöglicht es, die Struktur und das Layout der Produktionsebene zu modellieren.

Offline-Betriebsdatenerfassungssystem mit intelligenten Produkten

Die Aufgabe des Offline-Betriebsdatenerfassungssystems ist es, automatisiert Auftragsdaten mit Hilfe des intelligenten Produktes aufzunehmen und diese nach Abschluss des Herstellungsprozesses in einer strukturierten Form für weitere Anwendungen zur Verfügung zu stellen. Dies erfolgt durch zwei Funktionen. Innerhalb der Funktion *Erfassung Auftragsdaten* werden intelligente Produkte (hier durch die Verwendung der RFID-Technologie) dahingehend eingesetzt, um Zeitstempel von Start- bzw. Endzeiten der jeweiligen DLZ-Anteile in der Produktionsebene aufzunehmen und diese nach Abschluss der Produkterstellung zu Zeitintervallen zu verarbeiten. Die Funktion *Bewertung Produktionszustand* bildet darauf aufbauend produktionszustandsbeschreibende Kennzahlen für die einzelnen DLZ-Anteile, welche eine Aussage über die Leistungserbringung der betrachteten Produktion ermöglichen.

Auftragsdaten-Analysesystem

Das Ziel der Analyse der mit dem intelligenten Produkt aufgenommenen Auftragsdaten besteht in der Bereitstellung einer qualitativ hochwertigen Datengrundlage für die Maschinenbelegungsplanung, welche die darin liegende Unsicherheit minimiert bzw. berücksichtigt. Die Analyse der produktspezifischen Auftragsdaten wird durch die zwei Funktionen *Bereitstellung Stammdaten* und *Ableitung Produktionswissen* realisiert. Die erste Funktion hat die Aktualisierung der Stammdaten zur Aufgabe. Hierbei werden auf Grundlage der aufgenommenen DLZ-Anteile passende Wahrscheinlichkeitsverteilungen erzeugt und in die Stammdaten überführt. Die zweite Funktion liefert als Ergebnis das implizit in den produktspezifischen Auftragsdaten enthaltene Produktionswissen. Dieses

wird sowohl in Form von Regeln als auch Fällen dem Planungssystem zur Verfügung gestellt.

Wissensbasiertes Planungssystem

Das Planungssystem hat zur Aufgabe, die Maschinenbelegung entsprechend dem zu erwartenden Produktionszustand sowie weiteren impliziten Zusammenhängen (z. B. Auftragsfolge) mit Hilfe des zuvor erworbenen fall- wie auch regelbasierten Produktionswissens festzulegen und damit die Qualität des Planungsergebnisses zu erhöhen. Dies erfolgt mit Hilfe von drei Funktionen. Die Funktion *Planung Maschinenbelegung* hat die Terminierung der vom ERP-System übermittelten Produktionsaufträge auf die zur Verfügung stehenden Fertigungsmittel zur Aufgabe. Durch die Funktion *Prädiktion Produktionszustand* wird der zum Zeitpunkt der geplanten Durchführung des betrachteten DLZ-Anteiles vorliegende Produktionszustand bestimmt. Abschließend erfolgt durch die Funktion *Adaption Durchlaufzeit-Anteil* eine Überprüfung des DLZ-Anteils mit Hilfe eines wissensbasierten Systems, was u. U. eine notwendige Anpassung der Durchführungsdauer an die erwarteten Bedingungen in der Produktionsebene erfordert.

In den beiden nachfolgenden Kapiteln wird unter Berücksichtigung von bestehenden Forschungsansätzen und Normen das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung vorgestellt. Die Umsetzung und Validierung des entwickelten Systems erfolgt anhand Hard- und Software-Demonstratoren und wird in Kapitel 7 beschrieben.

5 Aufnahme und Verarbeitung produktspezifischer Auftragsdaten

5.1 Übersicht

Generell lassen sich die Auftragsdaten den organisatorischen Betriebsdaten zuordnen und führen zu einer höheren Transparenz hinsichtlich der aktuellen Produktionssituation (KURBEL 2005). Sie bestehen aus Produktionsdaten, wie z. B. Start- und Endtermine von Arbeitsgängen, differenzierte Zeitkomponenten (Liege-, Transport-, Bearbeitungs-, Rüst-, Störzeiten u. a.), Produktzustände, Auftragsstatus, Arbeitsfortschritt, Stückzahlen (Gutstückzahl, Ausschuss), Personaleinsatz, Materialeinsatz (Art, Menge) und Qualitätsdaten. Diese Betrachtung enthält allerdings nicht, unter welchen Umständen, dem sog. *Produktionszustand*, die erfassten Auftragsdaten entstanden sind. Dieser ist wie folgt definiert:

Der Produktionszustand entspricht der bewerteten Leistungsfähigkeit des betrachteten Arbeitssystems zu einem bestimmten Zeitpunkt (in Form von betriebsmittel- als auch auftragsbezogenen Attributen).

Nur durch die Hinzunahme produktionszustandsbeschreibender Attribute (z. B. Effektivität) für die einzelnen DLZ-Anteile ist es möglich, diese für Analyse- und Planungszwecke nachhaltig einzusetzen. Bezogen auf ein bestimmtes Produkt, lässt sich somit folgende Definition der produktspezifischen Auftragsdaten formulieren:

Produktspezifische Auftragsdaten beschreiben den Entstehungsprozess eines Produktes auf Basis von Produktionsdaten bei zusätzlicher Berücksichtigung des Produktionszustandes unter welchem die differenzierten DLZ-Anteile erbracht wurden.

Unter Berücksichtigung der Anforderungen an das zu entwickelnde System (vgl. Abschnitt 3.5) wird innerhalb des vorliegenden Kapitels die Haltung, Aufnahme und Verarbeitung der produktspezifischen Auftragsdaten behandelt und in den Kontext des KDD-Prozesses (vgl. Abschnitt 2.6.3) gesetzt. Hierzu wird in Abschnitt 5.2 ein Datenmodell entwickelt, welches eine durchgängige Haltung der Daten innerhalb des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung ermöglicht. Zur Aufnahme der produktspezifischen Auftragsdaten wird in Abschnitt 5.3 ein Ansatz zur produktbasierten Offline-Betriebsdatenerfassung vor-

gestellt, wobei ein Kennzahlensystem zur Beschreibung des Produktionszustandes verwendet wird. Die auf diese Art erfassten Daten dienen als Grundlage für die in Abschnitt 5.4 beschriebenen Analyseschritte. Diese haben die Bereitstellung von dynamischen Stammdaten sowie die Identifikation von impliziten Zusammenhängen innerhalb der produktspezifischen Auftragsdaten in fall- und regelbasierter Form zum Ziel.

5.2 Datenmodell für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung

5.2.1 Allgemeines

Zur Realisierung der Datendurchgängigkeit von der Planung der Maschinenbelegung über die Datenaufnahme im Produktionsprozess bis hin zur Datenanalyse, Stammdaten-Bereitstellung und Ableitung des Produktionswissens wird im vorliegenden Abschnitt ein Datenmodell beschrieben, welches alle Informationen für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung strukturiert verwaltet. Die Grundlage für die abzubildenden Informationen entstammt zum einen aus den eben dargestellten Anwendungsbereichen. Zum anderen haben sie ihren Ursprung in der zu realisierenden *Bearbeitungsaufgabe*, welche nach EVERSHEIM (1989) durch die Parameter *Auftragsdaten* (u. a. Losgröße, Jahresstückzahlen), *Geometrie* (u. a. Abmessungen, Formelemente), *Technologie* (u. a. Werkstoff, Oberflächenrauigkeit) und *Zeitwerte* (u. a. Rüst- und Bearbeitungszeiten, Werkzeugstandzeiten) sowie die daraus ableitbaren *Anforderungen an die Ressource* (u. a. Fertigungsverfahren, Werkzeuge) vollständig beschrieben werden kann. Im Rahmen der Arbeitsplanung werden zur Durchführung der Bearbeitungsaufgabe die hierzu notwendigen organisatorischen Abläufe, die technischen Fertigungsverfahren wie auch die Betriebsmittel auftrags- und terminneutral nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten festgelegt (WIENDAHL 2010). Das Ergebnis der Arbeitsplanung wird im *Arbeitsplan* festgehalten und beschreibt die Arbeitsvorgangsfolge zur Herstellung eines Teils, einer Gruppe oder eines Erzeugnisses (REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E. V. 1991). Die dabei relevanten Einzeldaten können in *vier Datengruppen* eingeteilt werden. Diese sind *allgemeine Daten zum Arbeitsplan* (u. a. Arbeitsplannummer, Ersteller), *Daten zum Ausgangsmaterial* (u. a. Sachnummer, Werkstoff, Stückliste), *Daten zum Fertigteil* (u. a. Sachnummer, Zeichnungsnummer) und *Daten zu jedem Arbeitsvorgang* (u. a. Arbeitsvorgangsnummer, Rüst- und Bearbeitungs-

zeit, Arbeitsplatz/ Ressource). Durch einen Kundenauftrag oder infolge des festgelegten Produktionsprogramms wird unter Berücksichtigung weiterer Auftragsparameter (u. a. Liefertermin, Losgröße) auf Basis des Arbeitsplanes ein Produktionsauftrag erzeugt, welcher in der Maschinenbelegungsplanung terminiert wird.

Aus diesen Überlegungen lässt sich ableiten, dass das Datenmodell für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung folgende Anforderungen erfüllen muss:

- Modellierung von Produktionsaufträgen und des Entstehungsprozesses von Produkten unter Berücksichtigung des Produktionszustandes (*Auftragsmodell*; vgl. Abschnitt 5.2.3).
- Modellierung der Fähigkeiten und der Konfiguration von Betriebsmitteln, um einen Abgleich mit den Anforderungen von Arbeitsvorgängen durchzuführen und diese zu terminieren (*Ressourcenmodell*; vgl. Abschnitt 5.2.4).
- Modellierung der Struktur und des Layouts der Produktionsebene als Basis für die Maschinenbelegungsplanung (*Produktionsmodell*; vgl. Abschnitt 5.2.5).

Ein wichtiges Kriterium bei der Entwicklung von Datenmodellen stellen standardisierte Datenstrukturen dar, um eine effiziente Verwendung der eingebrachten Informationen zu ermöglichen. Nach KLINGER & WENZEL (2000) weisen Datenmodelle dann einen Referenzcharakter auf, wenn die Eigenschaften *Vorlagencharakter, Allgemeingültigkeit, leichte Verständlichkeit, Anpassbarkeit, modularer Aufbau, Wiederverwendbarkeit und Unabhängigkeit von der Implementierungsform* erfüllt sind. Durch die zusätzliche Anlehnung an bestehende Normen, Richtlinien und Beschreibungsformen wird zudem die Akzeptanz wie auch Transparenz des Datenmodells erreicht.

Im Vorfeld der Beschreibung der einzelnen Teilmodelle wird noch auf den zugrundeliegenden graphenbasierten Modellierungsansatz von Arbeitsvorgangsfolgen (vgl. Abschnitt 5.2.2) eingegangen.

5.2.2 Graphenbasierte Modellierung von Arbeitsvorgangsfolgen

Das Produkt wird entsprechend DIN EN ISO 9000:2005 als „*Ergebnis eines Prozesses*“ definiert. Unter einem *Prozess* ist in diesem Kontext ein „*Satz von in Wechselbeziehung oder Wechselwirkung stehenden Tätigkeiten, der Eingaben in*

Ergebnisse umwandelt“ zu verstehen. Dabei wirken auf den Prozess sowohl *systematische* als auch *zufällige* Quellen ein. Demnach lassen sich die Arbeitsvorgänge zur Herstellung eines Produktes, unterteilt in die DLZ-Anteile *Rüsten*, *Bearbeiten*, *Transportieren* und *Liegen* (*vor und nach Bearbeitung*), als eine Folge von Prozessen ansehen, die den Plan- als auch Ist-Entstehungsprozess eines Produktes vollständig beschreiben. Zur Modellierung von Folgen dieser Art eignen sich Graphen⁶. Bei der Modellierung der DLZ-Anteile der Arbeitsvorgänge eines Produktes mit Hilfe von Graphen repräsentieren die Knoten den Zustand des Produktes zu einem Zeitpunkt t . Dieser entspricht einer Momentaufnahme des vorliegenden Produktionsfortschrittes eines Produktes mit den zugehörigen Eigenschaften und entsprechenden Attributen. Von Relevanz sind dabei organisations-, ablauf-, technologie-, geometrie- und strukturbezogene Informationen. Die Kanten stellen demgegenüber die Prozesse als auch Zeitintervalle dar, um vom Produktzustand des Vorgängerknotens i zum Produktzustand des Nachfolgerknotens j zu gelangen (vgl. Abbildung 20).

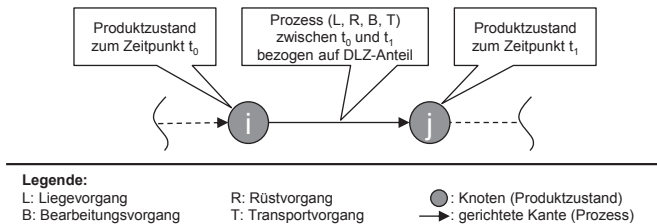


Abbildung 20: Graph zur Abbildung von DLZ-Anteilen

Dies führt infolge des betrachteten DLZ-Anteiles zu einer Veränderung von Attributen, die sich auf den Zustand des Produktes zu einem bestimmten Zeitpunkt beziehen. Für den *Transport* (T) ist dies der aktuelle Ort des Produktes. Im Fall des *Rüstens* (R) handelt es sich um die Konfiguration des ausführenden Fertigungsmittels. Für die *Bearbeitung* (B) betrifft dies ablauf-, geometrie- und strukturbezogene Attribute. Lediglich das *Liegen* (L) hat keine Veränderung eines produktbezogenen Attributes zur Folge.

⁶ Ein Graph $G = (V, E)$ ist ein Paar, bestehend aus einer Menge von Knoten (V) und einer Menge von Kanten (E), welche mathematische Modelle für netzartige Strukturen darstellen (TITTMANN 2003). Eine Kante $E(i, j)$ ist hierbei eine Menge der beiden Knoten i und j , welche entweder gerichtet (Reihenfolgebeziehung), auch als Digraph (engl. directed graph) bezeichnet, oder ungerichtet (keine Reihenfolgebeziehung) ist. Im Falle einer Folge von Knoten $[j_0, j_1, \dots, j_n]$ spricht man von einer Kette. Die Knoten wie auch Kanten können dabei Bewertungen aufweisen (DOMSCHKE & DREXL 2007).

Der beschriebene Modellierungsansatz ermöglicht die vollständige Beschreibung des resultierenden spezifischen Herstellungsprozesses eines Produktes als eine eindimensionale Graphenkette. Diese beinhaltet alle geplant wie auch ungeplant durchlaufenen DLZ-Anteile, welche durch oder an Betriebsmitteln stattgefunden haben, so auch Prozesse infolge von erforderlicher Nacharbeit (vgl. Abbildung 21, oben). Des Weiteren lassen sich im Falle der automatisierten Bestückung von Fertigungsmitteln, z. B. durch Handhabungsroboter, zudem die Bearbeitungszeit in die Haupt- und Nebenbearbeitungszeit durch mehrere Bearbeitungsprozesse in Folge modellieren (vgl. Abbildung 21, unten). Wichtig ist hierbei, dass pro Arbeitsvorgang nur eine Hauptbearbeitung enthalten ist.

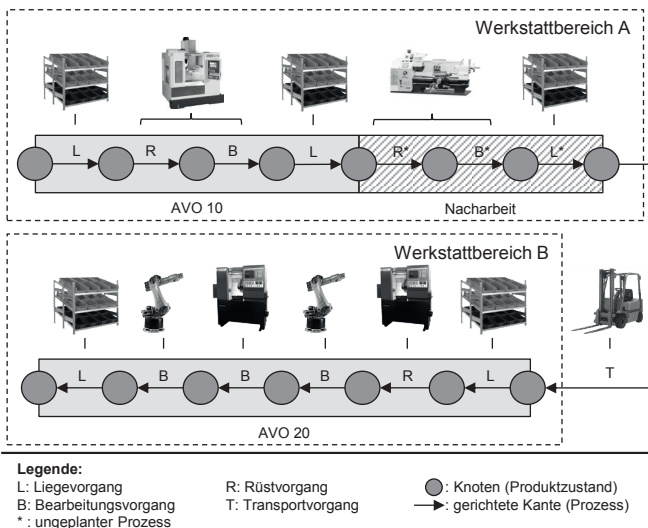


Abbildung 21: Graphenkette zur Beschreibung des resultierenden spezifischen Herstellungsprozesses eines Produktes inklusive ungeplanter DLZ-Anteile

Des Weiteren ist die Berücksichtigung von alternativen Fertigungsmitteln und/oder Herstellverfahren zur Maschinenbelegungsplanung durch Parallelstrukturen modellierbar. In Abbildung 22 ist dies auf der linken Seite für ein alternatives Fertigungsmittel im gleichen und auf der rechten Seite in einem anderen Werkstattbereich dargestellt.

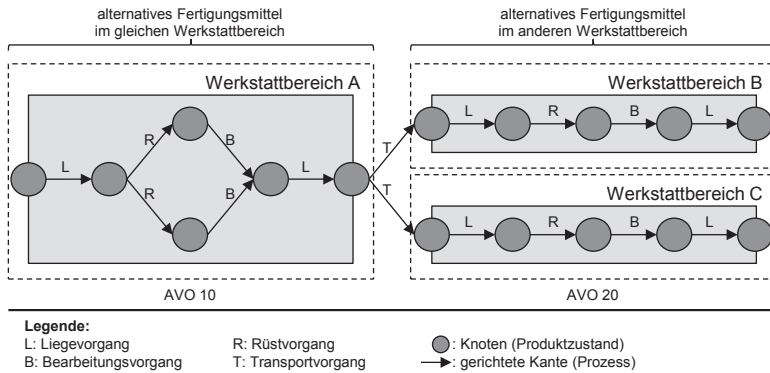


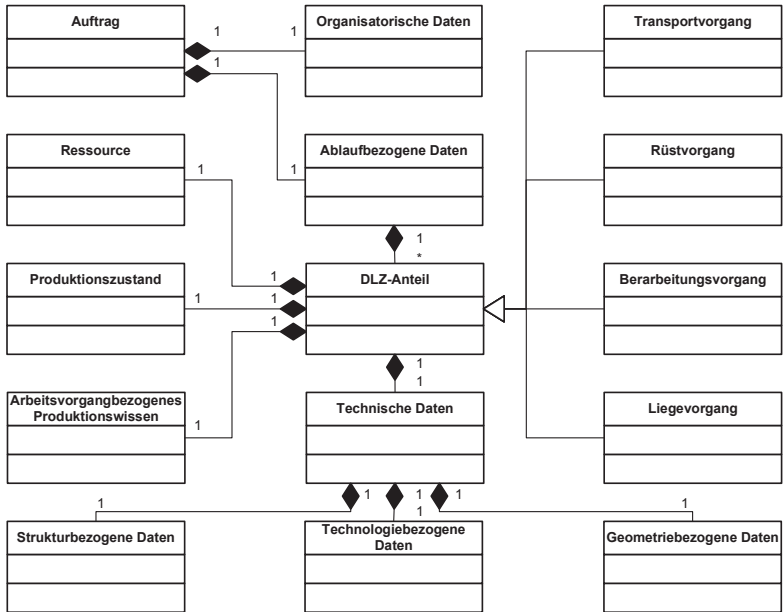
Abbildung 22: Modellierung des Herstellungsprozesses eines Produktes mittels Graphen unter Berücksichtigung alternativer Fertigungsmittel

5.2.3 Auftragsmodell

Das *Auftragsmodell* erfüllt den Zweck, Plan- und Ist-Daten über den spezifischen Herstellungsprozess eines Produktes strukturiert zu verwalten und stellt das zentrale Datenelement des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung dar. Durch den modularen und auftragsunabhängigen Aufbau können damit Arbeitsvorgänge von Produktionsaufträgen in der Arbeitsplanung modelliert und in der Maschinenbelegungsplanung terminiert, im Produktionsprozess durch spezifische Auftragsdaten ergänzt und nach abgeschlossener Herstellung durch produktionszustandsbeschreibende Attribute wie auch implizit vorliegende Zusammenhänge beschrieben werden.

Das Auftragsmodell ist in UML (Unified Modeling Language)-Notation in Abbildung 23 dargestellt. Es besteht in Anlehnung an den REFA-Standard-Arbeitsplan (REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSTUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E. V. 1991) aus organisatorischen (vgl. Arbeitsplankopf) und ablaufbezogenen (vgl. Arbeitsplanrumpf) Daten (vgl. Abschnitt 5.2.1). Die Klasse *Organisatorische Daten* beinhaltet zum einen Informationen, welche zum eindeutigen Identifizieren des Auftrages (u. a. Auftragsnummer, Sachnummer und Bezeichnung des fertigen Produktes, Liefertermin) notwendig sind. Zum anderen sind Informationen zum Ausgangsmaterial (u. a. Sachnummer, Werkstoff, Abmessungen) enthalten. Die Klasse *Ablaufbezogene Daten* des Auftrags-

modells entspricht einer chronologischen Auflistung der auftragsindividuellen Arbeitsvorgänge, unterteilt in die einzelnen DLZ-Anteile, und stellt dabei auch den auftragsunabhängigen Arbeitsplan dar.



Legende:

- Klasse
- Assoziation
- 0, 1, T, *, n Multiplizität der Assoziation
- Vererbung
- Aggregation

Abbildung 23: Auftragsmodell (Darstellung in UML)

Die Klasse *Technische Daten* vereint die jeden Arbeitsvorgang beschreibenden *strukturellen*, *technologischen* und *geometrischen Daten*. Diese bilden die Anforderungen an die Betriebsmittel (vgl. Abschnitt 5.2.4), um den jeweiligen Arbeitsvorgang auszuführen. Basierend auf dem in Abschnitt 5.2.2 beschriebenen graphenbasierten Modellierungsansatz von Arbeitsvorgangsfolgen werden im Auftragsmodell die vier elementaren DLZ-Anteile als Instanzen der Klasse *DLZ-Anteil* zur Verfügung gestellt. Im Rahmen der Maschinenbelegungsplanung können so die Rüst- und Bearbeitungsvorgänge, welche bereits in der Arbeitsplanung im Arbeitsplan festgelegt wurden, den hierzu zur Verfügung stehenden Be-

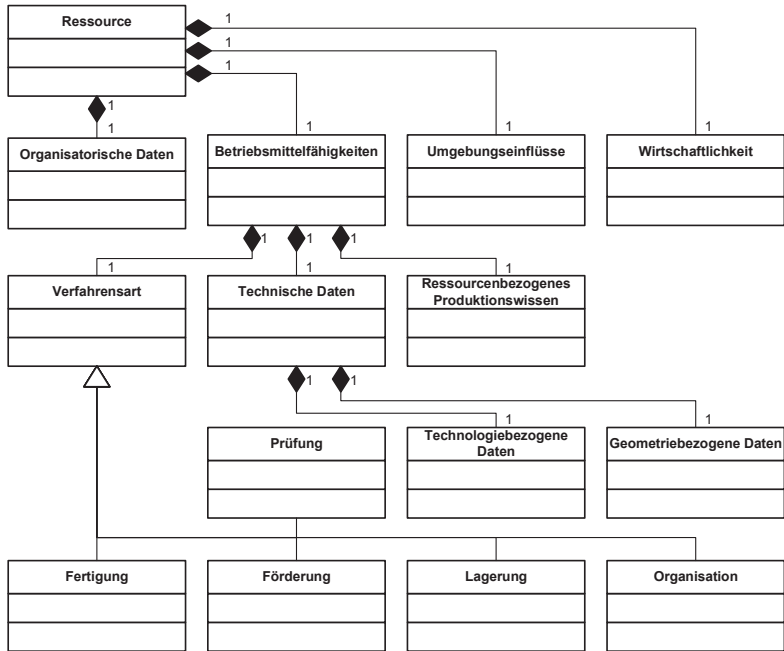
triebsmitteln zugeordnet und terminiert werden. Zur Beschreibung des spezifischen Herstellungsprozesses können in Ergänzung zu den Ist-Daten der Rüst- und Bearbeitungsvorgänge die Transport- und Liegevorgänge modelliert werden. Der modulare Aufbau des Datenmodells ermöglicht es zudem, veränderte Produktionsabläufe (z. B. Nacharbeit) durch die weitere Integration von DLZ-Anteilen abzubilden und gestattet so eine lückenlose Beschreibung des Herstellungsprozesses von Produkten. Auf dieser Basis kann zu jedem Zeitpunkt der Produktzustand in Form einer Momentaufnahme beschrieben werden. Überdies wird den einzelnen DLZ-Anteilen durch die Attribute der Klasse *Produktionszustand* (vgl. Abschnitt 5.3.3.3) der zum Zeitpunkt der Durchführung des DLZ-Anteils vorliegende Produktionszustand zugeordnet. Des Weiteren dient die Klasse *Arbeitsvorgangbezogenes Produktionswissen* zur Speicherung von impliziten Zusammenhängen, die sich auf die Dauer des DLZ-Anteils in Folge des vorliegenden Produktionszustandes wie auch der Auftragsfolge beziehen (vgl. Abschnitt 5.4.2.3). Zusammenfassend wird in Tabelle 4 dargestellt, welchen Attributen des Auftragsmodells im Rahmen der einzelnen Funktionen in den Phasen Planung, Produktion und Analyse Werte zugewiesen werden.

Phase	Funktion	ergänzte Attributwerte im Auftragsmodell	Art der Daten
Planungsphase	Planung Maschinenbelegung (vgl. Abschnitt 6.4.2)	organisatorische und technische Daten je DLZ-Anteil; ablaufbezogene Daten: Fertigungsmittel je DLZ-Anteil (Rüst- und Bearbeitungsvorgänge); Plan-Start- und Plan-Endzeitpunkt je DLZ-Anteil (Rüst- und Bearbeitungsvorgänge)	Plan-Daten
	Prädiktion Produktionszustand (vgl. Abschnitt 6.4.3)	Plan-Produktionszustand je DLZ-Anteil (Rüst- und Bearbeitungsvorgänge)	Plan-Daten
	Adaption Durchlaufzeit-Anteil (vgl. Abschnitt 6.4.4)	Plan-Start- und Plan-Endzeitpunkt je DLZ-Anteil (Rüst- und Bearbeitungsvorgänge)	Plan-Daten
Produktionsphase	Erfassung Auftragsdaten (vgl. Abschnitt 5.3.2.2)	weitere DLZ-Anteile (abweichend von Plan); Ist-Start- und Ist-Endzeitpunkt je DLZ-Anteil (Rüst-, Bearbeitungs-, Transport- und Liegevorgänge); durchführendes Betriebsmittel je DLZ-Anteil	Ist-Daten
	Bewertung Produktionszustand (vgl. Abschnitt 5.3.2.3)	Ist-Produktionszustand je DLZ-Anteil (Rüst-, Bearbeitungs-, Transport- und Liegevorgänge)	Ist-Daten
Analysephase	Bereitstellung Stammdaten (vgl. Abschnitt 5.4.2.2)	Parameter der Verteilungsfunktion der DLZ-Anteile	Ist-Daten
	Ableitung Produktionswissen (vgl. Abschnitt 5.4.2.3)	fall- und regelbasiertes Produktionswissen je DLZ-Anteil	Ist-Daten

Tabelle 4: Verwendung des Auftragsmodells infolge der jeweiligen Phasen

5.2.4 Ressourcenmodell

Das *Ressourcenmodell* dient der Beschreibung von Fähigkeiten und Konfiguration von Betriebsmitteln und ist in Abbildung 24 in UML-Notation dargestellt. Zum einen werden Instanzen des Ressourcenmodells in das Produktionsmodell (vgl. Abschnitt 5.2.5) zur Modellierung der aktuellen Konfiguration der Produktionsebene eingebunden. Zum anderen wird es zur Auswahl und Zuweisung von Arbeitsvorgängen zu geeigneten Anlagen und Maschinen im Rahmen der Maschinenbelegungsplanung verwendet (vgl. Abschnitt 6.4.2).



Legende:



Klasse

— Assoziation

0, 1, T, *, n Multiplizität der Assoziation



Vererbung

◆ Aggregation

Abbildung 24: Ressourcenmodell (Darstellung in UML)

In Anlehnung an die Betriebsmittelbeschreibung von MORYSON (2004) und das darauf aufbauende Datenmodell für adaptive Produktionssysteme von OSTGATHE (2012), erfolgt die Untergliederung des Ressourcenmodells in vier Klassen. Die Klasse *Organisatorische Daten* beinhaltet grundlegende Angaben zum Betriebsmittel (u. a. Ressourcen-Nummer, Hersteller) und dient der Identifikation. Kostenrelevante Informationen des Betriebsmittels, wie z. B. Anschaffungskosten, Maschinenstundensatz oder Instandhaltungskosten, werden in der Klasse *Wirtschaftlichkeit* bereitgestellt. Allgemeine Rahmenbedingungen für den Einsatz des Betriebsmittels, wie z. B. der Energieverbrauch, werden in der Klasse *Umgebungseinflüsse* geführt. In der Klasse *Betriebsmittelfähigkeiten* erfolgt die Beschreibung der technischen Daten, unterteilt in technologiebezogene (u. a. Werkstoff- und Oberflächenkennwerte) und geometriebezogene (u. a. Maß- und Toleranzangaben) Daten, wie auch in die Verfahrensart der Betriebsmittel. Von den in VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1 genannten Betriebsmitteln sind für die Maschinenbelegungsplanung zum einen die Fertigungsmittel, welche zur Wertschöpfung eingesetzt werden, und zum anderen Fördermittel, die für die innerbetriebliche Logistik zwischen den Werkstattbereichen dienen, von Relevanz. Zur Modellierung der Produktionsebene sind zusätzlich noch Lagermittel, Prüfmittel wie auch Organisationsmittel (z. B. RFID-Antennen) im Datenmodell integriert. Eine Beschreibung der unterschiedlichen Betriebsmittelarten ist in Tabelle 5 dargestellt.

Betriebsmittel	Beschreibung
Fertigungsmittel	Mittel zur direkten oder indirekten Form-, Substanz- oder Fertigungszustandsänderung, mechanischer bzw. chemisch-physikalischer Art.
Fördermittel	Mittel zur Orts- und Lageveränderung von Material, Erzeugnissen und anderen Gegenständen.
Lagermittel	Mittel zum Abstellen und Aufbewahren von Material, Erzeugnissen und Gegenständen.
Prüfmittel	Mittel, die bei der Durchführung von Fertigungsaufgaben zum Prüfen von Maßhaltigkeit, Funktion, Beschaffenheit und besonderen Eigenschaften dienen.
Organisationsmittel	Mittel, die als Hilfsmittel der Ablauforganisation eingesetzt werden. Sie dienen nicht der Be- oder Verarbeitung von Material oder Erzeugnissen.

Tabelle 5: Arten von Betriebsmitteln nach VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1

Die zugrundeliegenden Verfahren lassen sich für Fertigungsmittel anhand DIN 8580 gliedern. Die Haupt- und Untergruppen sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Hauptgruppen	Untergruppen
Urformen	Gießen, Sintern, Sprühkompaktieren
Umformen (DIN 8582)	Druckumformen (DIN 8583), Zugdruckumformen (DIN 8584), Zugumformen (DIN 8585), Biegeumformen (DIN 8586), Schubumformen (DIN 8587)
Trennen	Zerteilen (DIN 8588), Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide (DIN 8589-0), Spanen mit geometrisch unbestimmter Schneide (DIN 8589-0), Abtragen (DIN 8590), Zerlegen (DIN 8591), Reinigen (DIN 8592)
Fügen (DIN 8593)	Zusammensetzen, Füllen, An- und Einpressen, Fügen durch Urformen, Fügen durch Umformen, Fügen durch Schweißen, Fügen durch Löten, Kleben, Textiles Fügen
Beschichten	Lackieren, Verchromen
Stoffeigenschaften ändern	Verfestigen durch Umformen, Wärmebehandeln (EN 10053), Sintern und Brennen

Tabelle 6: Fertigungsverfahren nach DIN 8580

Des Weiteren werden in der Klasse *Ressourcenbezogenes Produktionswissen* implizite Zusammenhänge zwischen dem Produktionszustand und der Dauer der DLZ-Anteile beschrieben (vgl. Abschnitt 5.4.2.3). Dadurch lassen sich charakteristische Eigenheiten des Betriebsmittels abbilden, die unabhängig vom spezifischen Prozess auftreten, und bei der Maschinenbelegungsplanung verwenden.

5.2.5 Produktionsmodell

Das *Produktionsmodell* dient der Modellierung und Strukturierung der werkstattorientierten Produktionsebene und stellt eine digitale Beschreibung der aktuellen Produktionslandschaft dar. Im Rahmen der Maschinenbelegungsplanung (vgl. Abschnitt 6.4.2) wird es eingesetzt, um Produktionsaufträge auf die darin enthaltenen und somit zur Verfügung stehenden Fertigungsmittel zu terminieren.

Ausgehend von der Definition der Werkstattfertigung nach dem VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (1992, S. 184) (vgl. Fußnote 1) erfolgt eine Anordnung der Maschinen nach gleichen Bearbeitungsverfahren, welche örtlich zu einer Einheit (Werkstatt) zusammengefasst werden. Die Produktionsaufträge müssen gemäß der im jeweiligen Arbeitsplan vorgegebenen Verfahrensreihenfolge die verschiedenen Fertigungseinheiten durchlaufen (EVERSHEIM 1989). Abbildung 25 stellt die Struktur und die Beziehungen der in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen Betriebsmittelarten in den Kontext der Werkstattfertigung.

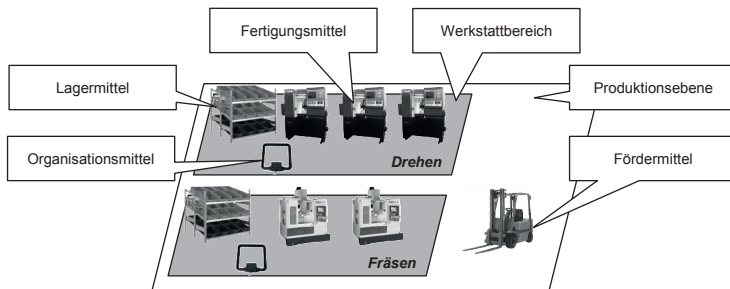
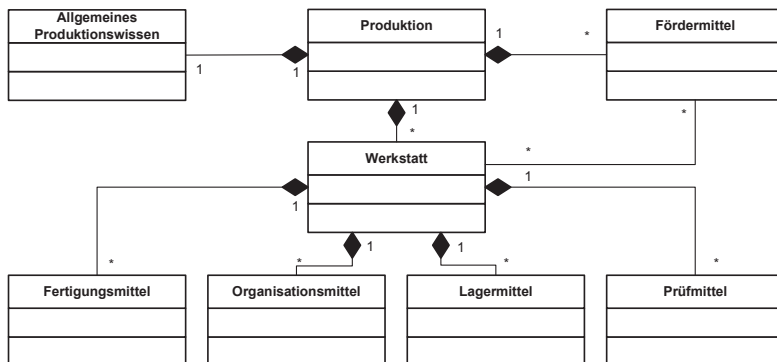


Abbildung 25: Strukturierung der Produktionsebene einer Werkstattfertigung

Das Produktionsmodell ist in Abbildung 26 in UML-Notation dargestellt. Die Klasse *Werkstatt* besteht aus mindestens einem Betriebsmittel der Arten *Fertigungsmittel*, *Lagermittel*, *Prüfmittel* und *Organisationsmittel*, welche spezifische Instanzen des in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen Ressourcenmodells darstellen.



Legende:

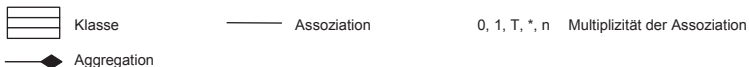


Abbildung 26: Produktionsmodell (Darstellung in UML)

Unter der Annahme, dass jeder Werkstattbereich nur über einen Wareneingang sowie einen Warenausgang verfügt, ist der Materialtransport ausschließlich zwischen den einzelnen Werkstätten zu betrachten. Dies erfolgt durch die Klasse *Fördermittel* (vgl. Abschnitt 5.2.4). Für den innerbetrieblichen Transport können beliebig viele Fördermittel dem Produktionsmodell hinzugefügt werden. Des

Weiteren werden in der Klasse *Allgemeines Produktionswissen* explizit festgelegte Regeln, die die gesamte Produktion betreffen, für Planungszwecke zur Verfügung gestellt (vgl. Abschnitt 5.4.2.3).

Mit Hilfe des Produktionsmodells lassen sich somit beliebige Produktionslandschaften abbilden. Durch den modularen Aufbau können Veränderungen, wie z. B. die Hinzunahme, die Konfiguration oder das Entfernen eines Betriebsmittels, aufwandsarm realisiert und für den Planungsprozess direkt nutzbar gemacht werden.

5.3 Aufnahme produktspezifischer Auftragsdaten

5.3.1 Allgemeines

Innerhalb des vorliegenden Kapitels wird das Offline-Betriebsdatenerfassungssystem vorgestellt, welches automatisiert Auftragsdaten mit Hilfe des intelligenten Produktes aufnimmt und diese nach dem Herstellungsprozess in einer strukturierten Form für weitere Anwendungen zur Verfügung stellt. Dies entspricht dem ersten (*Auswahl*) und zweiten (*Vorverarbeitung*) Schritt des von FAYYAD ET AL. (1996b) beschriebenen KDD-Prozesses (vgl. Abschnitt 2.6.3).

5.3.2 Systemelemente des Offline-Betriebsdatenerfassungssystems

Gemäß den Grundlagen zur Betriebsdatenerfassung in Abschnitt 2.4.2 besteht das hier beschriebene Offline-Betriebsdatenerfassungssystem aus sowohl hardwaretechnischen als auch softwaretechnischen Elementen, die erforderlich sind, um die Aufgaben der BDE zu erfüllen (vgl. Abbildung 27). Die hierzu benötigten *hardwaretechnischen Elemente* sind zum einen intelligente Produkte (vgl. Abschnitt 2.4.3) und zum anderen ein für den Zweck der Offline-BDE geeignetes Sensornetzwerk auf der Produktionsebene. Im vorliegenden Fall werden die Eigenschaften der RFID-Technologie verwendet, um *intelligente Produkte* zu identifizieren und Auftragsdaten auf dem integrierten Transponder zu speichern. Aufgrund des begrenzten Speichervolumens von RFID-Transpondern wird nicht das gesamte Auftragsmodell (vgl. Abschnitt 5.2.3) mit dem Produkt mitgeführt. So bestehen die auf dem intelligenten Produkt gespeicherten Daten lediglich aus der Auftragsnummer und speziell für diese Anwendung entwickelten Zeitstempeln (vgl. Abschnitt 5.3.3.2). Das *Sensornetzwerk* ermöglicht es intelligenten Produkten mit Fertigungsmitteln zu kommunizieren und besteht aus einer unbe-

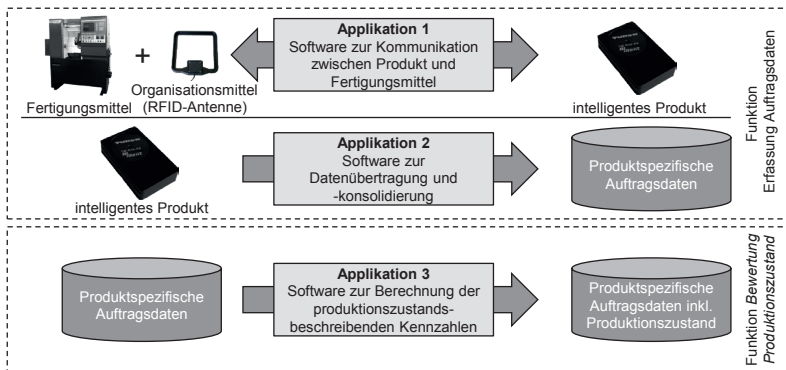


Abbildung 27: Hard- und softwaretechnische Elemente des Offline-Betriebsdatenerfassungssystems und Einordnung der Funktionen

grenzten Anzahl von RFID-Antennen, welche in die Steuerung des jeweiligen Werkstattbereichs eingebunden sind. Durch das Hinzufügen bzw. Reduzieren von Antennen in der Produktionsebene sowie als Organisationsmittel im Produktionsmodell (vgl. Abschnitt 5.2.5), beinhaltet das Offline-Betriebsdatenerfassungssystem eine ausreichende Skalierbarkeit, um die Anforderung nach Flexibilität zu erfüllen (vgl. Abschnitt 3.5).

Die *softwaretechnischen Elemente* bestehen aus der Software zur Kommunikation zwischen intelligentem Produkt und Fertigungsmittel zur Aufnahme der Auftragsdaten (Applikation 1), der Software zur Übertragung der auf dem Produkt gespeicherten Auftragsdaten in eine strukturierte Form und Ergänzung des zugehörigen Auftragsmodells (Applikation 2) sowie der Software zur Bildung einer ganzheitlichen Betriebsdatenerfassung auf Basis der aufgenommenen Auftragsdaten (Applikation 3). Die ersten beiden Applikationen werden durch die Funktion *Erfassung Auftragsdaten* (vgl. Abschnitt 5.3.3.2) realisiert. Die dritte Applikation wird durch die Funktion *Bewertung Produktionszustand* (vgl. Abschnitt 5.3.3.3) umgesetzt.

Auf Basis der dargestellten hardware- und softwaretechnischen Elemente werden im folgenden Abschnitt die damit realisierten Funktionen des Systems zur Offline-Betriebsdatenerfassung beschrieben.

5.3.3 Funktionen des Offline-Betriebsdatenerfassungssystems

5.3.3.1 Übersicht

Die Erfassung und Verarbeitung der produktspezifischen Auftragsdaten zu einer ganzheitlichen Betriebsdatenerfassung erfolgen auf Basis von zwei aufeinander aufbauenden Funktionen. Die Funktion *Erfassung Auftragsdaten* erfüllt die Aufgabe, durch den Einsatz intelligenter Produkte Zeitstempel von Start- bzw. Endzeiten der jeweiligen DLZ-Anteile in der Produktionsebene aufzunehmen und diese nach Abschluss der Produkterstellung zu Zeitintervallen zu verarbeiten (vgl. Abschnitt 5.3.3.2). Die Funktion *Bewertung Produktionszustand* bildet darauf aufbauend produktionszustandsbeschreibende Kennzahlen für die DLZ-Anteile, welche eine Aussage über die Leistungserbringung der betrachteten Produktion ermöglichen (vgl. Abschnitt 5.3.3.3).

5.3.3.2 Funktion Erfassung Auftragsdaten

Die Funktion *Erfassung Auftragsdaten* erfüllt die Aufgabe, die Auftragsdaten in der Produktionsebene am Ort ihrer Entstehung mit Hilfe eines intelligenten Produktes aufzunehmen. Zur Erfassung der an den Arbeitsvorgängen durchgeführten Arbeiten wird hierzu das Verfahren der Zeitpunktbuchung⁷ angewendet. Mit der ersten Buchung wird ein Zeitabschnitt, auch Buchungsintervall, gestartet und mit der zweiten Buchung geschlossen. Eine Buchung besteht aus den Informationen:

- Zeitstempel (Datum und Uhrzeit der Buchung)
- Art der Buchung (z. B. Rüsten, Start des Arbeitsvorganges)
- Identifikation des Arbeitsvorganges, auf den sich die Buchung bezieht
- Identifikation des Produktionsmitarbeiters, der die Buchung durchführt
- weitere Bearbeitungsinformationen (z. B. Stückzahlen, Ausschussgrad)

Um das Verfahren der Zeitpunktbuchung im Rahmen der Offline-Betriebsdatenerfassung einsetzen zu können, ist ein spezieller Zeitstempel erforderlich, welcher auch vor dem Hintergrund der begrenzten Speichergröße der RFID-Transponder eine ganzheitliche Betriebsdatenerfassung ermöglicht. Durch die Verwendung der Start-Start-Logik reduziert sich zudem die Anzahl notwen-

⁷ Nach GIENKE & KÄMPF (2007) eignet sich das Verfahren der Zeitpunktbuchung im Besonderen zum Einsatz in der Produktion, wenn exakte Werte für Bearbeitungsbeginn und -ende festgehalten werden sollen.

diger Buchungen, da eine startende Buchung automatisch das zuvor aktive Buchungsintervall beendet. Einzige Ausnahme stellt der Abschluss des letzten Arbeitsvorganges dar, welches eine Ende-Buchung repräsentiert. Um den gesamten Entstehungsprozess eines Produktes lückenlos aufzunehmen, werden daher alle DLZ-Anteile mit Hilfe des Zeitstempels erfasst. Da im vorliegenden Fall keine Betrachtung von Personalzeiten möglich ist, wird als auftragsübergreifendes Merkmal statt des buchenden Mitarbeiters der Werkstattbereich und das ausführende Betriebsmittel geführt. Der entwickelte Zeitstempel weist die in Abbildung 28 dargestellte Syntax auf.

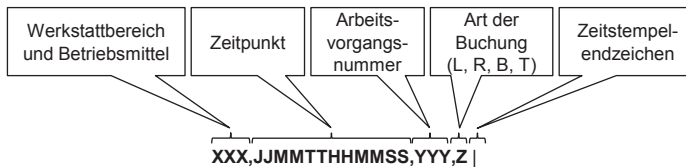


Abbildung 28: Syntax des Zeitstempels zur Aufnahme produktspezifischer Auftragsdaten

Hierbei repräsentiert der erste Ziffernblock den Produktionsbereich sowie das ausführende Betriebsmittel, der zweite Ziffernblock das aktuelle Datum sowie die Uhrzeit, der dritte Ziffernblock den aktuellen Arbeitsvorgang und der vierte Ziffernblock die Art der Buchung. Hierbei entspricht „B“ einem Bearbeitungsvorgang, „R“ einem Rüstvorgang, „L“ einem Liegevorgang und „T“ einem Transportvorgang. Abgeschlossen wird der Zeitstempel durch „|“. Basierend auf dem Arbeitsplan wird der Zeitstempel des jeweils startenden DLZ-Anteiles eines Arbeitsvorganges mit der zugehörigen Art der Buchung gesetzt und mit der Folgebuchung beendet.

Das in Abbildung 29 dargestellte Ablaufdiagramm veranschaulicht die Offline-Betriebsdatenerfassung für ein intelligentes Produkt ab der initialen Auftragsfreigabe bis hin zur Fertigstellung des Produktes gemäß dem zugrundeliegenden Arbeitsplan. Dies entspricht Applikation 1 (vgl. Abbildung 27). Mit der Freigabe des Produktionsauftrages wird das Produkt erstmals mit der Auftragsnummer und einem Zeitstempel mit der Buchungsart „T“ beschrieben und dem Transportsystem übergeben. Bei der Ankunft des Produktes im Ziel-Werkstattbereich erfolgt ein Setzen des Zeitstempels „L“ und das Zeitintervall „Liegen vor Bearbeitung“ beginnt. Sobald das Fertigungsmittel für den Arbeitsvorgang verfügbar ist, wird dieses gerüstet und ein entsprechender Zeitstempel auf das Produkt geschrieben.

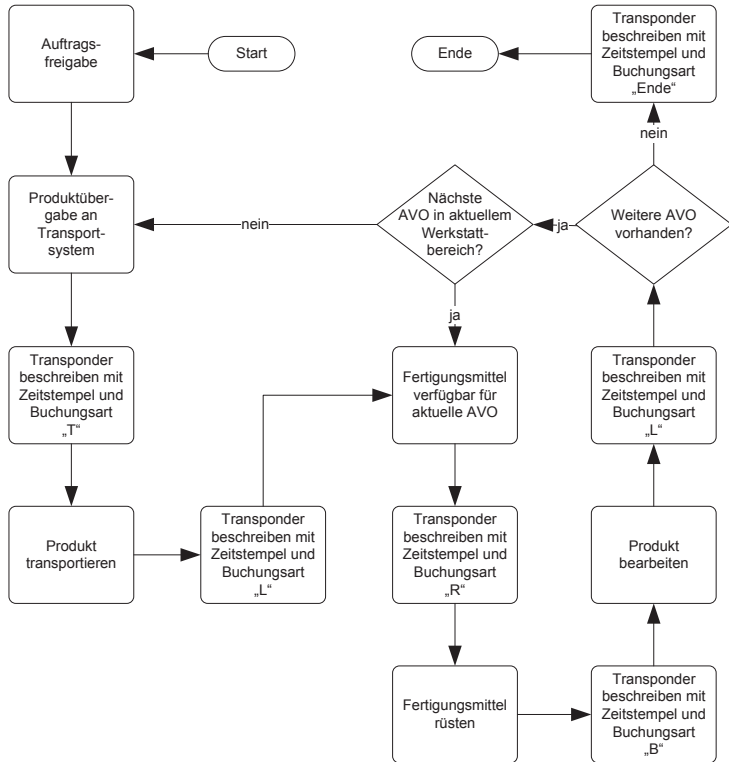


Abbildung 29: Ablaufdiagramm der Offline-Betriebsdatenerfassung unter Verwendung eines intelligenten Produktes (Darstellung nach DIN 66001)

Der Beginn des Bearbeitungsprozesses wird mit dem Zeitstempel mit der Buchungsart „B“ gestartet und mit dem Zeitstempel „L“ inklusive der Nummer des nachfolgenden Arbeitsvorganges, welches zeitgleich das Zeitintervall „Liegen nach Bearbeitung“ startet, beendet. Zu diesem Zeitpunkt erfolgt eine Überprüfung, ob weitere Arbeitsvorgänge im Arbeitsplan zu bearbeiten sind und ob diese im aktuellen Werkstattbereich durchzuführen sind. Ist dies der Fall verbleibt das Produkt dort und wartet auf den anstehenden Bearbeitungsprozess. Erfolgt der Arbeitsvorgang in einem anderen Werkstattbereich, so wird das Produkt dem Transportsystem übergeben und mit dem Zeitstempel für den Transportvorgang versehen. Ist der Arbeitsplan vollständig bearbeitet, wird das Produkt mit dem Zeitstempel und der zugehörigen Ende-Buchung beschrieben.

Anhand des Durchlaufelementes, welches bereits in Abschnitt 2.3.2 erläutert wurde, ergeben sich die in Abbildung 30 dargestellten Buchungen bezogen auf einen Arbeitsvorgang. Durch die sechs visualisierten Zeitstempel ist es somit möglich, diesen vollständig, unterteilt in die vier elementaren DLZ-Anteile, und entsprechend der graphenbasierten Modellierungsvorschrift (vgl. Abschnitt 5.2.2) zu beschreiben.

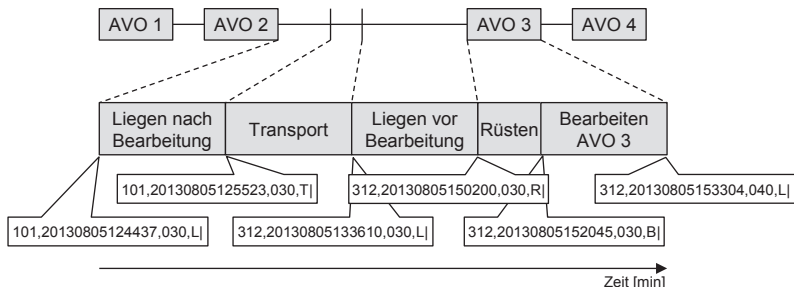


Abbildung 30: Durchlaufelement inklusive der gesetzten Zeitstempel

Die auf dem Transponder gespeicherten Zeitstempel jedes abgeschlossenen Produktionsauftrages werden im Anschluss zu Zeitintervallen extrahiert und mit den Plan-Auftragsdaten konsolidiert. Der Ablauf dieses Vorganges ist in Abbildung 31 dargestellt und entspricht Applikation 2 (vgl. Abbildung 27). Der Prozess beginnt mit einem abgeschlossenen Produktionsauftrag und dem Auslesen der Auftragsnummer sowie der Zeitstempel des Transponders. Mit Hilfe der Auftragsnummer wird der bei der Terminierung des Auftrags erzeugte Datensatz (vgl. Abschnitt 6.4.2), welcher eine Instanz des in Abschnitt 5.2.3 vorgestellten Auftragsmodells entspricht, geladen. Dieser enthält sowohl die organisatorischen Daten des Auftrages als auch die Plan-Werte der einzelnen DLZ-Anteile der Arbeitsvorgänge (Rüst- und Bearbeitungsvorgänge). Beginnend mit dem ersten Zeitintervall, welches durch die ersten beiden Zeitstempel definiert ist, startet die eigentliche Datenextraktion. Zuerst wird überprüft, ob der betrachtete DLZ-Anteil als Planwert im Datensatz vorhanden ist. Ist dies der Fall, erfolgt in einem weiteren Schritt die Überprüfung, ob der Arbeitsvorgang an der geplanten Ressource durchgeführt wurde oder eine andere Ressource verwendet wurde. Erst dann wird der Datensatz um die Ist-Daten ergänzt. Dies betrifft alle geplanten Rüst- und Bearbeitungsvorgänge, welche im Prozess der Maschinenbelegungsplanung terminiert wurden. Sollte kein Planwert zum betrachteten DLZ-Anteil vorliegen, wird der Datensatz um eine entsprechende Instanz des DLZ-Anteils

des Arbeitsvorgangs entsprechend des betrachteten Zeitintervalls erweitert und mit den Ist-Daten sowie dem ausführenden Betriebsmittel ergänzt. Hiervon sind alle Transport- und Liegevorgänge wie auch ungeplante Rüst- und Bearbeitungsvorgänge (u. a. Nacharbeit) betroffen. Dieser Vorgang wird solange wiederholt bis alle mit dem Produkt aufgenommenen Zeitintervalle in den Datensatz übertragen wurden.

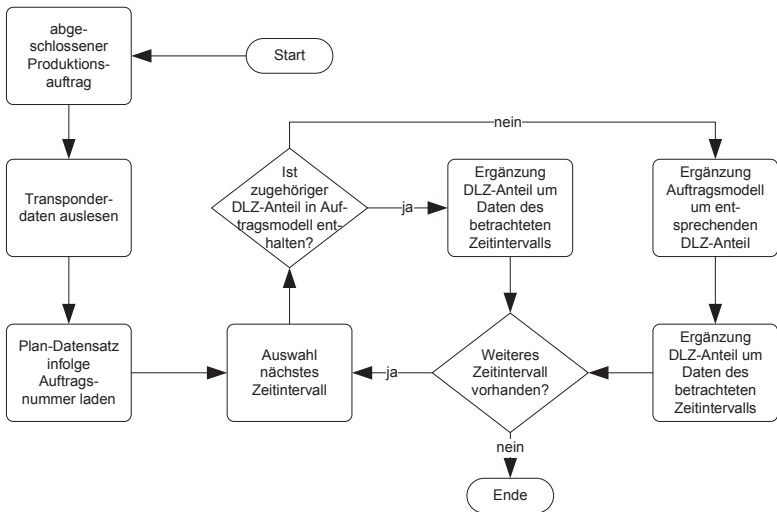


Abbildung 31: Ablaufdiagramm der Transponderdatenverarbeitung (Darstellung nach DIN 66001)

Das Ergebnis der Funktion *Erfassung Auftragsdaten* ist der Datensatz des Produktionsauftrags des betrachteten Produktes, welcher um die mit dem intelligenten Produkt aufgenommenen Auftragsdaten ergänzt ist. Hierbei handelt es sich um:

- geplante wie auch ungeplante DLZ-Anteile
- Ist-Start- und Ist-Endzeitpunkte sowie Zeitintervalle der DLZ-Anteile
- durchführendes Betriebsmittel je DLZ-Anteil

Die Funktion *Erfassung Auftragsdaten* erfüllt ausschließlich die Aufgaben zur Offline-Erfassung von Auftragsdaten mit Hilfe eines intelligenten Produktes und die Verarbeitung der aufgenommenen Zeitstempel zu Ist-Daten, welche im zugehörigen Auftragsmodell ergänzt werden. Die Steuerung der Produkte durch die

Produktion wird an dieser Stelle nicht betrachtet und ist nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit. Grundsätzlich ist die beschriebene Art der Betriebsdatenerfassung mit Hilfe des intelligenten Produktes mit sämtlichen bekannten Steuerungsverfahren kombinierbar, sofern ein entsprechendes Sensornetzwerk in der Produktionsebene vorhanden ist und die beschriebenen Applikationen 1 und 2 realisiert werden können.

5.3.3.3 Funktion Bewertung Produktionszustand

Die Funktion *Bewertung Produktionszustand* hat die Bestimmung des Produktionszustandes (vgl. Definition in Abschnitt 5.1) zur Aufgabe, unter welchem der betrachtete DLZ-Anteil durchgeführt wurde. In der Informationstechnik dienen zur Charakterisierung eines Zustandes⁸ Attribute, welche zu diesem Zweck unterschiedliche Ausprägungen (Werte) annehmen können (SCHUBERT & SCHWILL 2011). Zur Beschreibung des Zustandes eines beliebigen Objektes zum Zeitpunkt t erfolgt dies durch ein Tupel von n Attributen. Die Attributwerte müssen dabei vordefinierten formalen Regeln (z. B. numerisch, Anzahl Dezimalstellen, Wertebereich) entsprechen.

Kennzahlensystem zur Bewertung des Produktionszustandes

Im Rahmen des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung wird zur Bewertung des Produktionszustandes ein speziell entwickeltes Kennzahlensystem (vgl. Abschnitt 2.5) eingesetzt. Dabei wird die Tatsache zugrunde gelegt, dass ein Auftrag zu einem Zeitpunkt nur an einem Betriebsmittel bzw. Ort einen DLZ-Anteil (Rüsten, Bearbeiten, Transportieren und Liegen (vor/ nach Bearbeitung)) des aktuellen Arbeitsvorganges repräsentieren kann. Somit lässt sich durch die Attribute (Kennzahlen) des Betriebsmittels und die des Auftrags der vorliegende Produktionszustand umfassend beschreiben. Das entwickelte Kennzahlensystem besteht somit aus betriebsmittel- und auftragsbezogenen Kennzahlen. Die *betriebsmittelbezogenen Kennzahlen* geben eine Aussage über die Leistungsfähigkeit des betrachteten Betriebsmittels und seinen Zustand zu einem Zeitpunkt wieder. Demgegenüber dienen die *auftragsbezogenen Kennzahlen* der Bewertung der Qualität des gesamten Produkterstellungsprozesses und geben Auskunft über die Produktivität der Produktion bezogen auf den Auftrag. In Tabelle 7 ist das entwickelte Kennzahlensystem dargestellt.

⁸ Unter einem Zustand ist die „Art und Weise des Vorhandenseins von [...] einer Sache in einem bestimmten Augenblick“ (BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT GMBH 2013) zu verstehen.

5.3 Aufnahme produktspezifischer Auftragsdaten

Formelnummer	Kennzahl	Art der Kennzahl	Formel	Einheit/ Dimension	Wertebereich	Aussage über	
						Betriebsmittelnutzung	Durchlaufzeitterminierung
(1)	Planbelegungszeit	Absolutzahl	$PBZ = \text{Betriebszeit} - \text{Stillstände}_{\text{geplant}}$	h	$[0 - \infty]$	X	
(2)	Belegungszeit	Absolutzahl	$BZ = \sum t_R + \sum t_B$	h	$[0 - \infty]$	X	X
(3)	Hauptnutzungszeit	Absolutzahl	$HNZ = \sum t_B$	h	$[0 - \infty]$	X	X
(4)	Gesamtrüstzeit	Absolutzahl	$GRZ = \sum t_R$	h	$[0 - \infty]$	X	X
(5)	Gesamtstillstandszeit	Absolutzahl	$GSZ = \sum t_S$	h	$[0 - \infty]$	X	
(6)	Durchlaufzeit	Absolutzahl	$DLZ = \sum t_R + \sum t_B + \sum t_L + \sum t_T$	h	$[0 - \infty]$		X
(7)	Gesamttransportzeit	Absolutzahl	$GTZ = \sum t_T$	h	$[0 - \infty]$		X
(8)	Gesamtliegezeit	Absolutzahl	$GLZ = \sum t_L$	h	$[0 - \infty]$		X
(9)	Nutzgrad	Verhältniszahl	$NG = HNZ / BLZ$	%	$[0 - 100]$	X	
(10)	Beleggrad	Verhältniszahl	$BG = BLZ / DLZ$	%	$[0 - 100]$		X
(11)	Belegnutzgrad	Verhältniszahl	$BNG = BLZ / PBZ$	%	$[0 - 100]$	X	X
(12)	Prozessgrad	Verhältniszahl	$PG = HNZ / DLZ$	%	$[0 - 100]$		X
(13)	Rüstgrad	Verhältniszahl	$RG = \sum t_R / BLZ$	%	$[0 - 100]$	X	X
(14)	Effektivität	Verhältniszahl	$E = \sum (t_{BG} \cdot LG) / HNZ$	%	$[0 - 100]$	X	X
(15)	Durchsatz	Verhältniszahl	$D = PM / DLZ$	Stk./h	$[0 - \infty]$		X
(16)	Verfügbarkeit	Verhältniszahl	$V = HNZ / PBZ$	%	$[0 - 100]$	X	
(17)	Ausbringung	Verhältniszahl	$A = PM / PBZ$	Stk./h	$[0 - \infty]$	X	
(18)	Warteschlange	Absolutzahl	$WS = \sum \text{Aufträge an Station}$	Stk.	$[0 - \infty]$		X
(19)	Liegegrad	Verhältniszahl	$LG = \sum t_L / DLZ$	%	$[0 - 100]$		X
(20)	Stillstandsgrad	Verhältniszahl	$SG = \sum t_S / PBZ$	%	$[0 - 100]$	X	
(21)	Sicherheitsgrad Maschine	Verhältniszahl	$SGM = \sum t_{BS} + \sum t_{RS} / PBZ$	%	$[0 - 100]$	X	
(22)	Sicherheitsgrad Auftrag	Verhältniszahl	$SGA = \sum t_{BS} + \sum t_{RS} + \sum t_{TS} / PBZ$	%	$[0 - 100]$		X

Tabelle 7: Kennzahlensystem zur Bewertung des Produktionszustandes von DLZ-Anteilen

Darin sind zu jeder Kennzahl die entsprechende Formel, die Dimension und der Wertebereich sowie eine Zuordnung über deren Aussage angegeben. Die im Kennzahlensystem enthaltenen Verhältniszahlen stellen dabei die zur Produktionszustandsbeschreibung identifizierten Werte dar. Dahingegen werden die Absolutzahlen zu Berechnungszwecken der erstgenannten benötigt. Um einen hohen Grad der Akzeptanz in der Industrie zu gewährleisten, lehnt sich das Kennzahlensystem vornehmlich an das VDMA-Einheitsblatt 66412-1 sowie an Standardliteratur zu betriebswirtschaftlichen Kennzahlen (u. a. DANGELMAIER (2009), MEYER (2011) und WÖHE & DÖRING (2010)) an.

In Abbildung 32 sind die Zusammenhänge der einzelnen zeitbezogenen Attribute visualisiert. Im oberen Bereich ist dies aus Betriebsmittel- und im unteren Bereich aus Auftrags Sicht dargestellt und jeweils in Plan- und Istzeiten unterteilt.

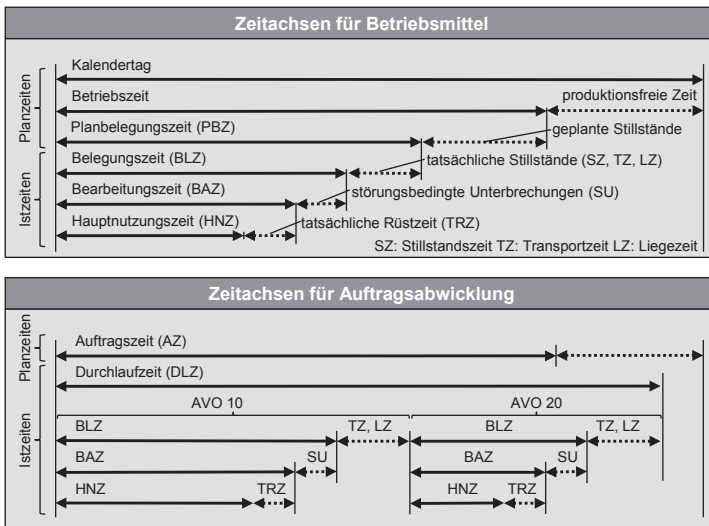


Abbildung 32: Zeitachsen für Betriebsmittel und Auftragsabwicklung (in Anlehnung an VDMA-Einheitsblatt 66412-1)

Die Festlegung auf die zu betrachtenden Kennzahlen wurde auf Basis der Aussagekraft bzgl. der Produktivität (Betriebsmittelnutzung und Durchlaufterminierung) unter Zugrundelegung der Kriterien *Problemangemessenheit*, *Konsistenz*, *Flexibilität*, *Benutzer- und Organisationsadäquanz* sowie *Wirtschaftlichkeit* (vgl. Abschnitt 2.4.2) durchgeführt. Da die Kennzahlen nur auf den mit dem Produkt

aufgenommenen Zeitwerten basieren, sind Kennzahlen bewusst nicht berücksichtigt, welche auf Aussagen über die Qualität von Produkten bzw. Prozessen (z. B. Overall Equipment Effectiveness (OEE)) genauso wie auf mitarbeiterbezogenen Daten aufbauen. Die enthaltenen 22 Kennzahlen bestehen aus Absolutzahlen (z. B. Durchlaufzeit), Verhältniszahlen (z. B. Belegnutzgrad) sowie implizit ableitbaren Sachverhalten (z. B. Warteschlange an Betriebsmittel) entsprechend dem Betrachtungsobjekt (Betriebsmittelnutzung und Durchlaufterminierung).

An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das beschriebene Kennzahlensystem keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt und dem Anwendungsfall (Charakteristika der betrachteten Produktionsebene) entsprechend spezifisch verändert werden kann. Dies ist möglich aufgrund der Tatsache, dass darin keine Spitzenkennzahl gebildet wird, da es sich um ein Ordnungssystem⁹, welches beliebig erweiterbar ist, und nicht um ein Rechensystem¹⁰ handelt. Im Falle des Einsatzes des Kennzahlensystems mit der in Abschnitt 5.3.3.2 beschriebenen produktbasierten Datenaufnahme ist es erforderlich, die genannten Kriterien zur Auswahl von Kennzahlen zu berücksichtigen. Für die Verwendung des Kennzahlensystems in einer anderen als der hier vorgestellten Anwendung, kann es auch um Kennzahlen erweitert werden, die diesen Kriterien nicht entsprechen, sofern die notwendige Informationsbereitstellung gewährleistet ist. Abschließend lässt sich festhalten, dass mit dem hier vorgestellten, auf dem VDMA-Einheitsblatt 66412-1 und Standardliteratur basierenden Kennzahlensystem, die relevantesten Kennzahlen für die produzierende Industrie, welche auf Zeitwerten basieren, bereits enthalten und für die Beurteilung des Produktionszustandes ausreichend sind.

Algorithmus zur Bewertung des Produktionszustandes

Der zur Bewertung des Produktionszustandes zugrundeliegende Algorithmus, wie er im System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung verwendet wird, ist in Abbildung 33 dargestellt. Zu Beginn ist das Bewertungsintervall φ (z. B. letzte 30 Kalendertage) festzulegen. Die in diesem Zeitintervall enthaltenen DLZ-Anteile werden im Rahmen des Bewertungsprozesses betrachtet. Um eine Vergleichbarkeit der Kennzahlen von mehreren Instanzen eines DLZ-Anteils zu

⁹ Ordnungssystem: Die Kennzahlen stehen in keiner mathematischen oder sachlogischen Verknüpfung zueinander (PREIBLER 2008).

¹⁰ Rechensystem: Mathematische und sachlogische Verknüpfung der einzelnen Kennzahlen zu einer Spitzenkennzahl (PREIBLER 2008).

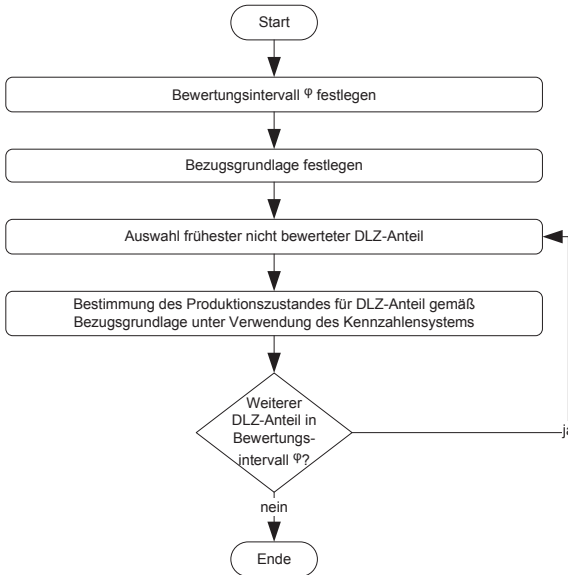


Abbildung 33: Algorithmus zur Bewertung des Produktionszustandes auf Basis von Ist-Daten (Darstellung nach DIN 66001)

realisieren, ist es essentiell, dass die identische Bezugsgrundlage¹¹ herangezogen wird, die ebenfalls festgelegt werden muss. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrifft dies das Zeitintervall *Planbelegungszeit* (vgl. Abbildung 32). Normalerweise wird dieses Zeitintervall bei der Planung definiert und steht der Maschinenbelegungsplanung zur Terminierung von Produktionsaufträgen auf Fertigungsmittel zur Verfügung. Typischerweise ist es kleiner als ein Kalendertag und entspricht der Betriebszeit abzüglich geplanter Stillstände (vgl. Abbildung 32). Um sicherzustellen, dass bei der späteren Verwendung der Kennzahl im Rahmen der Analyse oder bei der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung die Bezugsgrundlage bekannt ist, wird diese als zusätzliches Attribut mitgeführt.

Weitere Zeitintervalle, die im vorgestellten Kennzahlensystem als Bezugsgrundlage herangezogen werden, sind entweder von der Planbelegungszeit abhängig (z. B. Hauptnutzungszeit) oder weisen über den Auftragsbezug bereits eine Ver-

¹¹ Bei der Verwendung von Verhältniszahlen ist es nicht ersichtlich, ob sich die Veränderung dieser durch den Zähler oder Nenner ergibt. Daher ist es unerlässlich, die zugrundeliegenden absoluten Zahlen anzugeben (PREIBLER 2008).

gleichbarkeit auf (z. B. Durchlaufzeit). Daher sind diese nicht gesondert zu betrachten. Standardmäßig entspricht die Bezugsgrundlage der Planbelegungszeit, kann jedoch auch individuell angepasst werden. In diesem Fall ist darauf zu achten, dass die Bezugsgrundlage weder zu groß noch zu klein gewählt wird, da die Aussagekraft der Kennzahlen davon direkt abhängt. Im Weiteren wird für die im Bewertungsintervall enthaltenen DLZ-Anteile der Produktionszustand mit Hilfe des beschriebenen Kennzahlensystems berechnet und den zugehörigen Auftragsdatensätzen hinzugefügt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt, bis alle DLZ-Anteile bewertet sind.

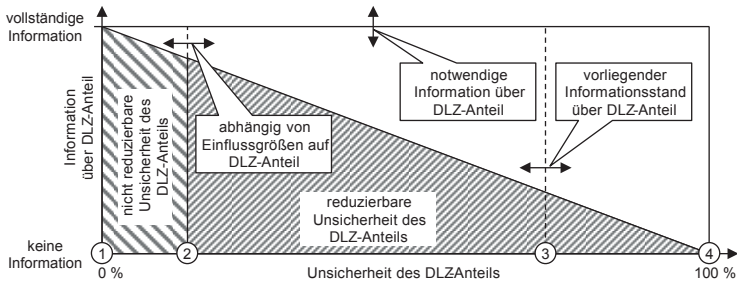
Das Ergebnis der Funktion *Bewertung Produktionszustand* ist die Ergänzung der Datensätze der betrachteten Produktionsaufträge um die Instanz *Produktionszustand* je DLZ-Anteil der Arbeitsvorgänge gemäß dem beschriebenen Kennzahlensystem. Der dadurch vorliegende Datenbestand der produktspezifischen Auftragsdaten stellt zugleich die abgeschlossene Offline-Betriebsdatenerfassung als auch die Grundlage für die Analyse der produktspezifischen Auftragsdaten dar, welche in Abschnitt 5.4 behandelt wird.

5.4 Analyse produktspezifischer Auftragsdaten

5.4.1 Allgemeines

Im vorliegenden Kapitel wird die Analyse der produktspezifischen Auftragsdaten beschrieben. In Bezug auf den KDD-Prozess (vgl. Abschnitt 2.6.3) werden hierbei die Schritte 3 (*Transformation*), 4 (*Data Mining*) und 5 (*Interpretation*) durchlaufen. Das Ziel der Datenanalyse besteht in der Bereitstellung einer qualitativ hochwertigen Datengrundlage für die Maschinenbelegungsplanung, welche die darin liegende Unsicherheit¹² minimiert bzw. berücksichtigt. Der Zusammenhang zwischen der Unsicherheit eines DLZ-Anteils in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Information ist in Abbildung 34 dargestellt. Fall 1 und 4 stellen die theoretischen Grenzfälle des Falles 3 dar. Fall 2 beschreibt den Punkt, der im Idealfall, unter Eliminierung aller epistemischer Unsicherheiten, erreicht werden kann. Für das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung bedeutet

¹² Die Unsicherheit lässt sich in die aleatorische und die epistemische Unsicherheit unterteilen. *Aleatorische Unsicherheiten* sind systemimmanente, nicht vorhersehbare statistische Abweichungen. Sie lassen sich durch Beobachten ermitteln, sind jedoch nicht reduzierbar. Demgegenüber basieren *epistemische Unsicherheiten* auf einem Informationsmangel und können grundsätzlich durch entsprechende Maßnahmen eliminiert werden (MAG 1990, WINKLER 1996).



Legende:

- ① : Vollkommene Information bezüglich aller Einflussgrößen und Daten des Modells
- ② : Vollkommene Information bezüglich der bestimmaren Einflussgrößen und Daten des Modells
- ③ : Unvollkommene Information bezüglich der Einflussgrößen und Daten des Modells
- ④ : Vollkommene Ignoranz bezüglich der Einflussgrößen und Daten des Modells
- ▨ Anteil der aleatorischen Unsicherheit des DLZ-Anteils
- ▧ Anteil der epistemischen Unsicherheit des DLZ-Anteils

Abbildung 34: Zusammenhang zwischen der Unsicherheit des DLZ-Anteils in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Information

dies, dass eine Reduktion der epistemischen Unsicherheiten in den Stammdaten durch die Steigerung der hierzu vorhandenen Informationen herzustellen ist. Einerseits wird dies durch die Bereitstellung von Wahrscheinlichkeitsverteilungen für die jeweiligen DLZ-Anteile realisiert, was zu einer dynamischen Anpassung der Terminierungsparameter führt (vgl. Abschnitt 5.4.2.2). Andererseits werden im Rahmen der Analyse zu diesem Zweck eine regel- sowie fallbasierte Wissensbasis geschaffen, die der Maschinenbelegungsplanung zu Grunde gelegt werden (vgl. Abschnitt 5.4.2.3). Des Weiteren sind die aleatorischen Unsicherheiten bei der Maschinenbelegungsplanung soweit zu berücksichtigen, dass trotz zufälliger Einflüsse ein hoher Lieferterminerfüllungsgrad erreicht wird. Dies erfordert ein entsprechendes Wissen über die Streuung der einzelnen DLZ-Anteile, welche ebenfalls in der Maschinenbelegungsplanung zu berücksichtigen sind.

5.4.2 Funktionen des Auftragsdaten-Analysesystems

5.4.2.1 Übersicht

Die Analyse der produktspezifischen Auftragsdaten wird durch die zwei Funktionen *Bereitstellung Stammdaten* und *Ableitung Produktionswissen* realisiert. Die erste Funktion hat die Aktualisierung der Stammdaten zur Aufgabe. Hierbei werden auf Grundlage der aufgenommenen DLZ-Anteile passende Wahrscheinlich-

keitsverteilungen erzeugt (vgl. Abschnitt 5.4.2.2). Die zweite Funktion liefert als Ergebnis das implizit in den produktspezifischen Auftragsdaten enthaltene Produktionswissen. Dieses wird sowohl in Form von Regeln als auch Fällen dem Planungssystem zur Verfügung gestellt (vgl. Abschnitt 5.4.2.3).

5.4.2.2 Funktion Bereitstellung Stammdaten

Die Funktion *Bereitstellung Stammdaten* hat die Aktualisierung und Bereitstellung der Fertigungsstammdaten zum Ziel. Dies betrifft die Planzeiten der DLZ-Anteile Rüsten und Bearbeiten aller Arbeitsvorgänge der Arbeitspläne sowie die Zeitwerte für den Transport zwischen den Werkstattbereichen. Die Grundlage stellen die mit dem intelligenten Produkt aufgenommenen Daten dar.

Konventionell wird die Dauer eines DLZ-Anteiles über Erfahrungswerte bzw. auf Basis von Ist-Daten aus der Produktion bestimmt (KURBEL 2005). Um die darin liegenden Unsicherheiten auszugleichen, werden die daraus gebildeten Stammdaten mit einem pauschalen Sicherheitsfaktor (z. B. 20 %) versehen (DANGELMAIER 2009, S. 1346). Dieses Vorgehen führt dazu, dass jeder DLZ-Anteil deutlich länger angenommen wird als er tatsächlich ist. Die Folge ist, dass der Produktionsplan der tatsächlichen Situation in der Produktionsebene nicht genau entspricht. Innerhalb des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung wird daher eine andere Art für den Umgang mit Datenunsicherheiten herangezogen, welche mit individuell an den jeweiligen DLZ-Anteil angepassten Sicherheitsfaktoren funktioniert. Auf diese Weise lässt sich der aleatorische Anteil der Datenunsicherheit für jeden DLZ-Anteil spezifisch, d. h. in Folge dessen Streuung, berücksichtigen. Dies erfolgt durch die Auffassung der unsicheren Eingangsparameter (hier die Zeitwerte der DLZ-Anteile in den Stammdaten) nicht wie konventionell als feste Größe, sondern als Zufallsvariable¹³. Im System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung besteht die Planzeit t_p aus der Grundzeit t_G und dem individuellen Sicherheitsaufschlag Δt_S :

$$t_p = t_G + \Delta t_S \quad (23)$$

¹³ Zur Beschreibung des zufälligen Verhaltens einer oder mehrerer Ursachen eignen sich nach KNETSCH (2004) im Besonderen Wahrscheinlichkeitsverteilungen, deren Parameter auf Basis der verfügbaren Daten approximiert werden können. Hierfür können verschiedene Verteilungstypen, wie z. B. Normalverteilung, logarithmische Normalverteilung, Weibullverteilung, Rayleigh-Verteilung sowie die Mischverteilung herangezogen werden (SCHULZE & DIETRICH 2008).

Die Zusammensetzung des Planwertes ist zudem in Abbildung 35 dargestellt. Die Planzeit t_p wird dabei als Wahrscheinlichkeitsverteilung P über die Dichtefunktion $f: \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$ der reellwertigen Zufallsvariablen T auf Basis der mit dem intelligenten Produkt aufgenommenen Ist-Werte der DLZ-Anteile beschrieben.

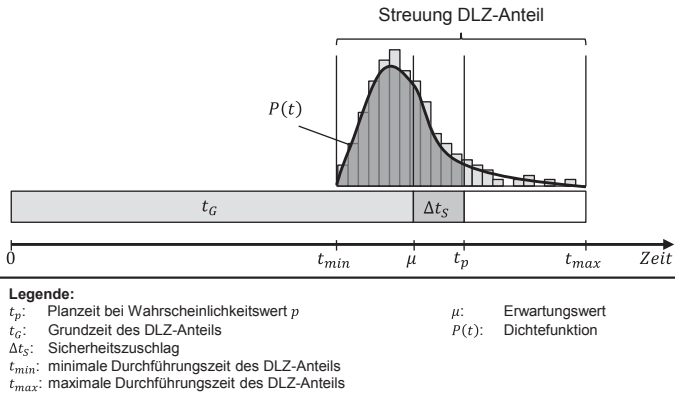


Abbildung 35: Planzeit t_p eines DLZ-Anteils als Dichtefunktion $P(t)$ auf Basis der mit dem intelligenten Produkt aufgenommenen Durchführungszeiten

Dabei gilt

$$P(a \leq T \leq b) = \int_a^b f(t) dt \quad (24)$$

unter der Voraussetzung, dass von

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(t) dt = 1 \quad (25)$$

ausgegangen wird. Zudem wird angenommen, dass die Wahrscheinlichkeit für $t < 0$ gleich Null ist. Durch Integration der Dichtefunktion oder direkter Verwendung der kumulierten Verteilungsfunktion F kann die Wahrscheinlichkeit P für ein Intervall entsprechend

$$P(T \in [a, b]) = \int_a^b f(t) dt = F(b) - F(a) \quad (26)$$

berechnet werden. Durch die Bildung eines einseitigen Konfidenzintervalls um den Erwartungswert μ in dem p % aller möglichen Werte für die Durchfüh-

rungsdauer des DLZ-Anteils liegen, lassen sich die Zeitwerte der DLZ-Anteile in den Stammdaten als Zufallsvariable beschreiben. Die Planzeit t_p eines DLZ-Anteils ist demnach definiert als der Zeitwert, welcher p % aller Werte gemäß der zugrundeliegenden Verteilungsfunktion umfasst und entspricht:

$$p \cdot P(T \in [-\infty, +\infty]) = \int_{-\infty}^{t_p} f(t) dt = F(t_p) - F(-\infty) = F(t_p) \quad (27)$$

Um sicherzustellen, dass in der Maschinenbelegungsplanung ausschließlich Stammdaten herangezogen werden, welche realistische Planzeiten darstellen, wird die Einschränkung $t_p \geq \mu$ getroffen. Der Erwartungswert μ ist definiert als

$$\mu = \int_{-\infty}^{+\infty} t f(t) dt \quad (28)$$

und entspricht im Weiteren der sog. Grundzeit t_G , welche die Zeitdauer repräsentiert, die im Mittel bei der Durchführung des DLZ-Anteils auftritt. Zur zusätzlichen Berücksichtigung der spezifischen Streuung jedes DLZ-Anteils (entspricht der aleatorischen Unsicherheit) wird als Richtwert für den Sicherheitszuschlag Δt_s die Standardabweichung σ empfohlen und als ausreichend betrachtet¹⁴. Die Standardabweichung σ ergibt sich aus

$$\sigma = \sqrt{V(T)} \quad (29)$$

und stellt die Streuung der Durchführungsdauer des DLZ-Anteils dar. Die zugrundeliegende Varianz $V(T)$ berechnet sich nach:

$$V(T) = \int_{-\infty}^{+\infty} (t - \mu)^2 \cdot f(t) dt \quad (30)$$

Unter den vorgenannten Überlegungen ergibt sich folgende Zusammensetzung der Planzeit t_p :

$$t_p = \mu + \sigma \quad (31)$$

¹⁴ Nach SCHULZE & DIETRICH (2008) entspricht dies bei einer Normalverteilung 84,14 % der gemessenen Werte.

Die Durchführung der Stammdaten-Bereitstellung erfolgt entsprechend des in Abbildung 36 dargestellten Algorithmus. Zu Beginn sind die zur Stammdaten-Bereitstellung notwendigen Parameter festzulegen. Dies ist erforderlich, um sicherzustellen, dass die Stammdaten-Bereitstellung für den betrachteten DLZ-Anteil nur durchgeführt wird, wenn die im Betrachtungsintervall zugrundelie-

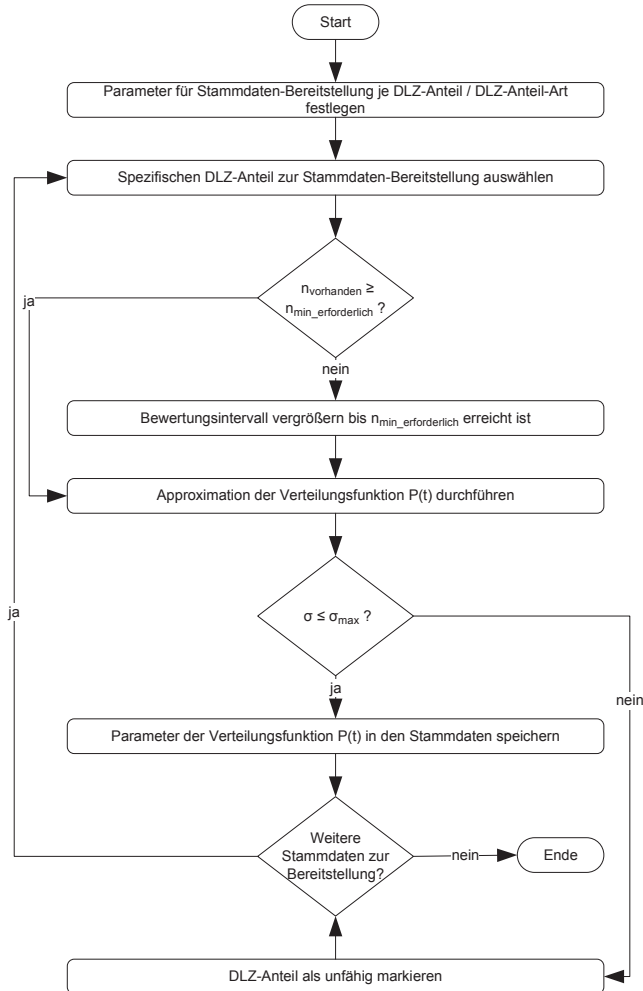


Abbildung 36: Algorithmus zur Bereitstellung von aktualisierten Stammdaten (Darstellung nach DIN 66001)

gende Datenbasis zu validen Ergebnissen führt und dementsprechend repräsentativ ist. Die Betrachtungsintervalle stellen dabei zeitliche Bereiche dar, die im Vorfeld auf Basis der Spezifika der betrachteten Produktion zu bestimmen sind. Sie fungieren somit auch als Steuerungsinstrumente, die sowohl die Betrachtung der zeitlichen Veränderung (u. a. Trend) der Durchlaufdauern von DLZ-Anteilen ermöglichen als auch deren Veränderungsgeschwindigkeit bestimmen. Bei der Festlegung der Bewertungsintervalle sollte daher darauf geachtet werden, dass diese groß genug sind, um keine Instabilität zu erzeugen und klein genug, um eine moderate Veränderung des Planwertes zu gewährleisten.

Des Weiteren ist sicherzustellen, dass eine ausreichend große Anzahl an bereits gemessenen spezifischen DLZ-Anteilen vorliegt und die maximale akzeptable Streuung σ_{max} für den DLZ-Anteil bzw. die DLZ-Anteil-Art nicht übertroffen wird, um damit eine hinreichend genaue Aussage zu treffen. In Anlehnung an die Berechnung der Größe von Stichproben¹⁵ wird die Anzahl erforderlicher DLZ-Anteile $n_{min_erforderlich}$ wie folgt bestimmt:

$$n_{min_erforderlich} = \frac{t_{Signifikanz}^2 \cdot p \cdot (1 - p)}{e^2} \quad (32)$$

Dabei entspricht e der Fehlertoleranz¹⁶, $t_{Signifikanz}$ dem Signifikanzniveau¹⁷ und p dem zuvor festgelegten Wahrscheinlichkeitswert.

Um auch eine Stammdaten-Bereitstellung für spezifische DLZ-Anteile durchzuführen, welche nur sehr selten auftreten, ist im Algorithmus vorgesehen, das Betrachtungsintervall so lange zu vergrößern, bis $n_{min_erforderlich}$ erreicht ist. Jedoch geht dadurch der Zeitbezug verloren und eine Aussage über die zeitliche Veränderung des spezifischen DLZ-Anteils ist nicht mehr möglich.

Die maximale akzeptable Streuung σ_{max} dient der Berücksichtigung der aleatorischen Datenunsicherheit bei der Stammdaten-Bereitstellung. Dieser Grenzwert

¹⁵ Nach KOHN (2005) ist eine Stichprobe eine Teilmenge der Grundgesamtheit (d. h. der interessierenden Masse), welche bei statistischen Untersuchungen erfasst wird und durch ein oder mehrere gleiche Merkmale gekennzeichnet ist.

¹⁶ Die Fehlertoleranz (auch Stichprobenfehler) entspricht der Abweichung zwischen wahren Mittelwert der Grundgesamtheit zum Mittelwert der Stichprobe (KOHN 2005).

¹⁷ Das Signifikanzniveau (auch Vertrauensniveau) bezeichnet nach MITTAG (2012) die Wahrscheinlichkeit, mit der im Rahmen eines Hypothesentests die Nullhypothese fälschlicherweise verworfen werden kann, obwohl sie eigentlich richtig ist. Dies wird ebenfalls als Fehler erster Art oder α -Fehler bezeichnet. In DIN 1319-3 befindet sich z. B. eine Tabelle mit Werten von $t_{Signifikanz}$ (Studentsche t-Verteilung).

hat die Aufgabe, spezifische DLZ-Anteile zu identifizieren, welche eine zu große Streuung aufweisen und somit einen unfähigen Prozess darstellen, welcher keinen ausreichenden Determinismus beinhaltet. Spezifische DLZ-Anteile dieser Art können nicht im Rahmen des entwickelten Systems behandelt werden und erfordern eine Überprüfung des zugrundeliegenden Prozesses und dessen Parametern. Eine Stammdaten-Bereitstellung findet hierbei nicht statt.

Die gerade beschriebenen Anforderungen zur Durchführung der Stammdaten-Bereitstellung sind zusammengefasst in Abbildung 37 anhand dreier hintereinanderliegender Betrachtungsintervalle dargestellt. Nur wenn die Forderungen nach einer ausreichenden Anzahl von bereits gemessenen spezifischen DLZ-Anteilen sowie eine akzeptable Streuung erfüllt sind, ist die zugrunde liegende Datenbasis repräsentativ und führt zu validen Ergebnissen.

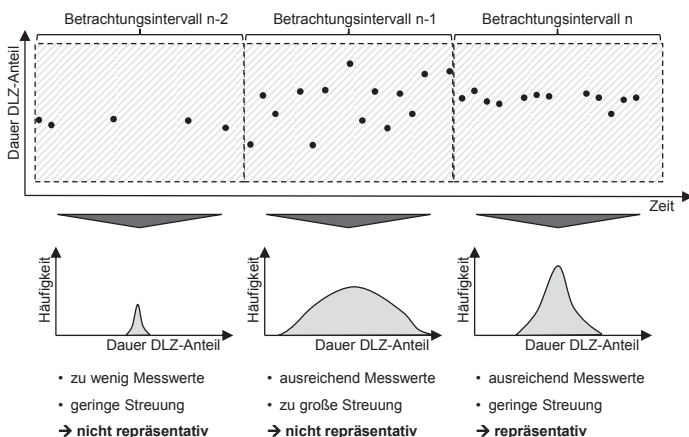


Abbildung 37: Voraussetzung für die Bereitstellung von Stammdaten anhand von drei Betrachtungsintervallen

Bei Abschluss der Stammdaten-Bereitstellung liegen die folgenden Werte über einen spezifischen DLZ-Anteil vor, welche in den Stammdaten für Planungszwecke zur Verfügung gestellt werden. Hierbei handelt es sich um den Typ der Verteilungsfunktion, den Erwartungswert μ , die Standardabweichung σ , den Nullpunkt t_0 (bei Wahrscheinlichkeitsverteilungen mit Nullpunkt) sowie den Wahrscheinlichkeitswert p . Der Algorithmus wird so lange wiederholt, bis alle spezifischen DLZ-Anteile überprüft und ggf. bereitgestellt wurden.

Das Ergebnis der Funktion *Bereitstellung Stammdaten* ist demnach die Ergänzung der Arbeitsplan-Datensätze der betrachteten Produktionsaufträge hinsichtlich der Dauer des DLZ-Anteils um die genannten Parameter der zugehörigen Verteilungsfunktion. Die bereitgestellten Stammdaten werden im Rahmen der Maschinenbelegungsplanung (vgl. Abschnitt 6.4.2) verwendet.

5.4.2.3 Funktion Ableitung Produktionswissen

Die Funktion *Ableitung Produktionswissen* hat die Aufgabe, aus der Gesamtheit der erfassten DLZ-Anteile, Wissen in fall- und regelbasierter Form zu generieren. Dieses Wissen dient in der Maschinenbelegungsplanung dazu, um auf Basis des prädiktiv bestimmten zukünftigen Produktionszustandes Manipulationen am Belegungsplan durchzuführen und diesen auf der Grundlage des Produktionswissens zu optimieren. Dadurch erfolgt eine Steigerung der zur Verfügung stehenden Informationen, was zu einer Reduzierung der epistemischen Datenunsicherheit (vgl. Abschnitt 5.4.1) führt.

Im Weiteren dieses Abschnitts werden zum einen die verschiedenen Arten des Produktionswissens im Rahmen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung definiert. Zum anderen wird ein Vorgehen beschrieben, um dieses Wissen aus den produktspezifischen Auftragsdaten zu extrahieren und für die Maschinenbelegungsplanung verfügbar zu machen.

Arten des Produktionswissens

Das Produktionswissen lässt sich in vier Wissensarten unterteilen (vgl. Abbildung 38). In absteigender Reihenfolge hinsichtlich der Genauigkeit des beinhalteten Wissens sind dies das DLZ-Anteil-bezogene Produktionswissen, das ressourcenbezogene Produktionswissen, das auftragsfolgebezogene Produktionswissen und das allgemeine Produktionswissen.

Das *DLZ-Anteil-bezogene Produktionswissen* beschreibt Zusammenhänge zwischen dem Prozess, der durch den betrachteten DLZ-Anteil repräsentiert wird, und dem vorliegenden Produktionszustand. Diese Wissensart besteht aus Altfällen, welche zuvor bereits stattgefunden haben und erfasst wurden. In Folge der Häufigkeit, die ein spezifischer DLZ-Anteil durchgeführt wird, erhöht sich damit auch die Aussagekraft des enthaltenen Wissens. Repräsentiert wird diese Wissensart durch Fälle. Die Anwendung des DLZ-Anteil-bezogenen Produktionswissens im Rahmen der Maschinenbelegungsplanung erfolgt durch das Verfahren des fallbasierten Schließens.

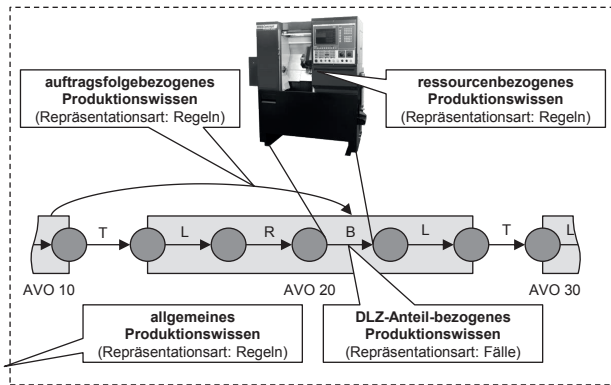


Abbildung 38: Arten des Produktionswissens

Demgegenüber stellt das *ressourcenbezogene Produktionswissen* den Zusammenhang zwischen dem DLZ-Anteil-ausführenden Betriebsmittel und dem Produktionszustand dar. Damit lassen sich charakteristische Eigenheiten des Betriebsmittels abbilden, die unabhängig vom spezifischen Prozess entstehen. Dies gibt zudem die Möglichkeit, dieses Wissen für artgleiche Betriebsmittel zu verwenden bzw. die Ist-Daten der artgleichen Betriebsmittel zusätzlich zur Ableitung dieser Wissensart zu nutzen. Gerade für neue Produkte, welche bisher noch nicht bzw. nur in einer geringen Anzahl hergestellt wurden, lassen sich hiermit bereits vorhandene Erkenntnisse, ohne ein ausgeprägtes DLZ-Anteil-bezogenes Produktionswissen zur Verfügung zu haben, berücksichtigen. Diese Wissensart wird durch Regeln repräsentiert.

Inhalt des *auftragsfolgebezogenen Produktionswissens* sind Zusammenhänge zwischen hintereinander stattfindenden Arbeitsvorgängen. Zum einen betrifft dies Beziehungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden Arbeitsvorgängen auf dem gleichen Betriebsmittel. Zum anderen werden Beziehungen zwischen Arbeitsvorgängen eines Auftrages auf unterschiedlichen Betriebsmitteln betrachtet. Es besteht somit die Möglichkeit, Auswirkungen zwischen Arbeitsvorgängen wie auch Betriebsmitteln übergreifend abzubilden und in der Belegungsplanung zu berücksichtigen. Dies betrifft z. B. die notwendige längere Bearbeitung auf dem nachfolgenden Betriebsmittel, wenn ein bestimmtes Betriebsmittel den vorherigen Arbeitsvorgang ausgeführt hat. Diese Wissensart wird durch Regeln repräsentiert.

Zusammenhänge, die die gesamte Produktion betreffen, werden im *allgemeinen Produktionswissen* festgehalten. Hierbei handelt es sich um Regeln, welche unabhängig von den aufgenommenen Ist-Daten in der Produktionsebene definiert werden. Es lassen sich somit zudem explizite Vorgaben machen, die bei der Belegungsplanung berücksichtigt werden. Dies kann z. B. die Verlängerung der Bearbeitungszeit um einen zuvor festgelegten Faktor sein, sofern ein bestimmtes Material oder auch ein Produkt vorliegt, das bisher noch nicht gefertigt wurde bzw. keine entsprechende Erfahrung bei dem bearbeitenden Mitarbeiter vorliegt. Diese Wissensart wird ebenfalls durch Regeln repräsentiert.

Zur Speicherung und Verfügbarmachung des erworbenen Produktionswissens werden im System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung sowohl fall- als auch regelbasierte Formen (vgl. Abschnitt 2.6.2.3) verwendet. Aufgrund der Unterschiedlichkeit in der Ableitung und Repräsentation zwischen fall- und regelbasiertem Wissen, erfolgt im Folgenden eine getrennte Betrachtung der beiden genannten Gebiete. Die Grundlage für die Extraktion des Produktionswissens stellen die produktspezifischen Auftragsdaten inklusive der Bewertung des Produktionszustandes (vgl. Abschnitt 5.3.3) dar.

Ableitung des fallbasierten Produktionswissens

Unter einem DLZ-Anteil-Fall f wird im Rahmen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung ein spezifischer DLZ-Anteil und der Produktionszustand, unter welchem dieser durchgeführt wurde, verstanden. Ein DLZ-Anteil-Fall besteht aus den Elementen, die zum einen das Problem bzw. die Situation, hier die sog. identifizierenden und produktionszustandsbeschreibenden Attribute, und zum anderen die Lösung, hier die lösungsbeschreibenden Attribute, darstellen (vgl. Abschnitt 2.6.2.3). Die *identifizierenden Attribute* haben die Aufgabe, einen DLZ-Anteil-Fall eindeutig zu beschreiben. Hierzu zählen Attribute, wie z. B. die Auftragsnummer, die Arbeitsvorgangsnummer, die Bereichs- und Betriebsmittelnummer sowie der Durchführungszeitpunkt. Die *produktionszustandsbeschreibenden Attribute* geben die Situation zum Zeitpunkt der Durchführung des DLZ-Anteil-Falls in der Produktion wieder und sind durch das in Abschnitt 5.3.3.3 beschriebene Kennzahlensystem repräsentiert. Das *lösungsbeschreibende Attribut* beinhaltet Informationen über die Dauer des DLZ-Anteil-Falls. Formal lässt sich ein DLZ-Anteil-Fall durch die Zuordnung von n Attributen darstellen:

$$f = (a_1; a_2; \dots; a_n) \quad (33)$$

Dies entspricht den Instanzen der Klasse Arbeitsvorgang (vgl. Abschnitt 5.2.3) von abgeschlossenen und bewerteten Produktionsaufträgen der produktspezifischen Auftragsdaten (vgl. Abbildung 39).

identifizierende Attribute				lösungsbeschreibendes Attribut				produktionszustandsbeschreibende Attribute			
Auftragsnummer	Startzeit	Werkstatt	Fertigungsmittel	Produkt	AVO	Bearbeitungszeit	Nutzgrad	Verfügbarkeit	BestgradM	Durchsatz	
563	23.07.2012 23:34:17.9708	2	1	C	20	28,23	0,20582	0,18254	0,48858	4,99	
221	22.10.2012 07:25:29.1543	3	4	A	70	102,45	0,1100	0,1100	0,1100	40,35	

Abbildung 39: Exemplarische Sicht auf die produktspezifischen Auftragsdaten und Zuordnung der fallbeschreibenden Attribute für Bearbeitungsvorgänge

Durch die strukturierte Datenhaltung lassen sich diese direkt dem wissensbasierten System als Fallbasis (vgl. Abschnitt 6.4.4) zur Verfügung stellen.

Ableitung des regelbasierten Produktionswissens

Das regelbasierte Produktionswissen wird mit Ausnahme des allgemeinen Produktionswissens, da dieses explizit festgelegt wird, durch Induktion (vgl. Abschnitt 2.6.1) aus den produktspezifischen Auftragsdaten abgeleitet. Hierbei stellt das Abweichungsverhältnis τ (vgl. Formel (34)) der Dauer des betrachteten spezifischen DLZ-Anteils das Zielattribut der Analyse dar. Der zugrundeliegende Ablauf ist Abbildung 40 zu entnehmen und bezieht sich immer auf eine DLZ-

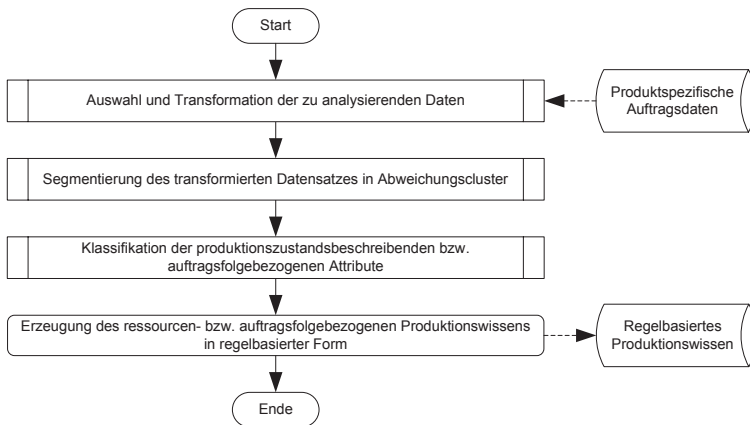


Abbildung 40: Algorithmus zur Ableitung des regelbasierten Produktionswissens auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten (Darstellung nach DIN 66001)

Anteil-Art (z. B. Bearbeiten) eines Betriebsmittels. Zu Beginn des Algorithmus werden die Daten zur Ableitung des ressourcen- und auftragsfolgebezogenen Produktionswissens ausgewählt, transformiert und um die Abweichungsverhältnisse τ ergänzt. Darauf aufbauend erfolgt im Rahmen der Segmentierung die Einteilung des transformierten Datensatzes in sog. Abweichungskuster, welche Partitionen ähnlicher Abweichungsverhältnisse darstellen. Diese werden im Schritt der Klassifikation hinsichtlich des Einflusses des Produktionszustandes sowie der Auftragsfolge auf die Abweichungskuster untersucht. Die dabei abgeleiteten Zusammenhänge werden in Form von Regeln formuliert und als Regelbasis dem wissensbasierten System (vgl. Abschnitt 6.4.4) zur Verfügung gestellt. Im Weiteren erfolgt eine ausführliche Beschreibung dieser Schritte.

Auswahl und Transformation der zu analysierenden Daten

Die produktspezifischen Auftragsdaten liegen bereits in vorverarbeiteter Form (d. h. vollständig, fehlerfrei, redundanzfrei; vgl. Abschnitt 2.6.3) vor und müssen noch zur Ableitung des ressourcen- und auftragsfolgebezogenen Produktionswissens in eine entsprechende Form transformiert werden. Der zugrundeliegende Ablauf ist für Fertigungsmittel in Abbildung 41 dargestellt. Ausgehend von der Festlegung auf ein spezifisches Fertigungsmittel und eines Betrachtungsintervalls wird ein entsprechender Datensatz in den produktspezifischen Auftragsdaten

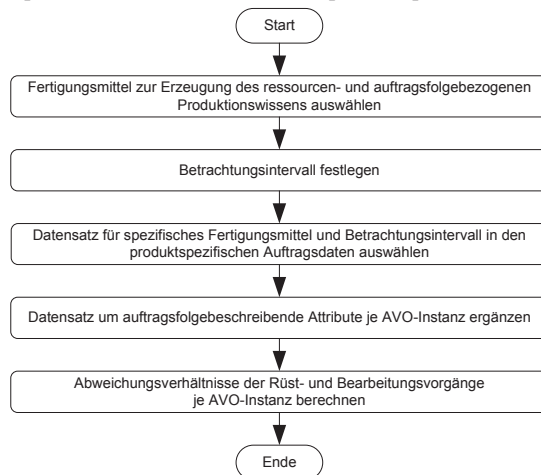


Abbildung 41: Algorithmus zur Auswahl und Transformation der zu analysierenden Daten zur Ableitung des ressourcen- und auftragsfolgebezogenen Produktionswissens für Fertigungsmittel

ausgewählt. Die Angabe eines Betrachtungsintervalls ermöglicht hierbei, wie ebenfalls in der Funktion *Bereitstellung Stammdaten* (vgl. Abschnitt 5.4.2.2), die Berücksichtigung der zeitlichen Veränderung des Betrachtungsobjektes, hier das regelbasierte Produktionswissen.

Im darauffolgenden Schritt werden die einzelnen DLZ-Anteil-Instanzen um Daten erweitert, welche sich auf die jeweiligen Vorgänger sowohl auf dem gleichen Fertigungsmittel als auch in der Auftragsfolge beziehen. Zur Realisierung einer Vergleichbarkeit der DLZ-Anteil-Instanzen einer DLZ-Anteil-Art ist es des Weiteren erforderlich, den Datensatz um das Abweichungsverhältnis τ der relevanten DLZ-Anteil-Arten zu ergänzen.

$$\tau = \frac{t_{DLZ-Anteil}}{\mu_{DLZ-Anteil}} \tag{34}$$

Durch die Betrachtung der anteiligen Abweichung des Intervalls zwischen der gemessenen Durchführungszeit $t_{DLZ-Anteil}$ und dem spezifischen DLZ-Anteil-bezogenen Erwartungswert $\mu_{DLZ-Anteil}$ (vgl. Abschnitt 5.4.2.2), ist es möglich, DLZ-Anteil-Instanzen, welche zu unterschiedlichen Produkten und AVOs gehören, für die nachfolgenden Data Mining Schritte zu verwenden. Da die produktionszustandsbeschreibenden Attribute in Form von Verhältniszahlen vorliegen, sind bei diesen keine Anpassungen erforderlich und sie sind zusammen mit dem Abweichungsverhältnis τ gültig.

Exemplarisch ist in Abbildung 42 ein Ausschnitt eines transformierten Datensatzes für ein spezifisches Fertigungsmittel dargestellt. Dieser enthält neben identifizierenden Attributen das DLZ-Anteil-bezogene Abweichungsverhältnis sowie

Auftragsnummer	betrachtetes Fertigungsmittel				Zielattribute		auftragsfolgebeschreibende Attribute				produktionszustandsbeschreibende Attribute			
	Werkstatt	Fertigungsmittel	Produkt	AVO	Abweichungsverhältnis τ		Werkstatt Vorgänger AVO	Fertigungsmittel Vorgänger AVO	Vorgängerprodukt auf Fertigungsmittel	Nutzgrad	Verfügbarkeit	RuestgradM	Durchsatz	
					R	B								
563	2	1	C	20	1,07	0,94	1	4	A	0,20582	0,18257	0,48858	4,99	
622	2	1	C	20	-	1,15	1	3	C	0,25012	0,0954	0,58049	1,78	
23	2	1	A	10	1,12	1,11	-	-	D	0,4489	0,2496	0,3304	7,88	
114	2	1	B	40	0,84	1,20	3	1	D	0,2187	0,2221	0,2467	6,02	

Abbildung 42: Exemplarische Sicht auf einen transformierten Datensatz zur Ableitung des Produktionswissens eines Fertigungsmittels

produktionszustands- als auch auftragsfolgebeschreibende Attribute.

Die Auswahl und Transformation der zu analysierenden Daten für Transportmittel erfolgt äquivalent zu den Fertigungsmitteln. Jedoch basieren diese auf dem Transportvorgang und den Transportstrecken zwischen den Werkstattbereichen.

Segmentierung des transformierten Datensatzes in Abweichungscluster

Auf Grundlage des transformierten Datensatzes wird die Segmentierung durchgeführt. Das Ziel ist die Bildung einer unbestimmten Anzahl von sog. *Abweichungsclustern* C_i , mit $i = 1, \dots, c$, welche auf dem Abweichungsverhältnis τ der DLZ-Anteile basieren. Die Abweichungscluster stellen Partitionen ähnlicher Abweichungsverhältnisse dar, die im Schritt der nachfolgenden Klassifikation verwendet werden, um den Einfluss der produktionszustands- als auch auftragsfolgebeschreibenden Attribute zu untersuchen. Da im hier vorliegenden Fall im Vorfeld der Segmentierung die Anzahl i der Abweichungscluster nicht bekannt ist, eignen sich vornehmlich agglomerative hierarchische Clusterverfahren¹⁸. Im System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung wird daher ein auf der SAHN-Clusteranalyse¹⁹ basierender Algorithmus verwendet, welcher in Abbildung 43 dargestellt ist. Zu Beginn ist es erforderlich, das Abbruchkriterium festzulegen. Im Rahmen des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung wird als Abbruchkriterium die Abweichungsclusterbreite k verwendet, die den Abstand zwischen den beiden entferntesten Objekten in den im Schritt i zu vereinigenden beiden Clustern C_{ia} und C_{ib} beschreibt.

$$\text{dist} \left(\max_{\tau \in C_{ia}, C_{ib}} \tau, \min_{\tau \in C_{ia}, C_{ib}} \tau \right) = k > k_{\max} \quad (35)$$

Dies erfolgt auf der Zielstellung, eine hohe Intrahomogenität der Elemente innerhalb jedes Abweichungsclusters sowie eine hohe Intraheterogenität zwischen den Abweichungsclustern zu erreichen. Die Variable k_{\max} stellt hierbei die festzulegende maximale Abweichungsclusterbreite dar. Des Weiteren wird die Annahme getroffen, dass zu Beginn der Segmentierung alle DLZ-Anteil-Instanzen, repräsentiert durch die Abweichungsverhältnisse τ_k , mit $k = 1, \dots, n$, eigene Cluster

¹⁸ Agglomerative hierarchische Clusterverfahren stellen ein distanzbasiertes Verfahren dar, welches sukzessive n Objekte bzw. Klassen vereint, bis entweder nur noch eine Klasse vorliegt oder ein zuvor definiertes Abbruchkriterium (z. B. eine bestimmte Clusteranzahl oder ein maximaler Abstand der Cluster (ERTEL 2009)) erreicht wurde (KOHN 2005).

¹⁹ Sequentielle agglomerative hierarchische nichtüberlappende Clusteranalyse (SAHN). Weiterführende Informationen finden sich hierzu u. a. bei RUNKLER (2010).

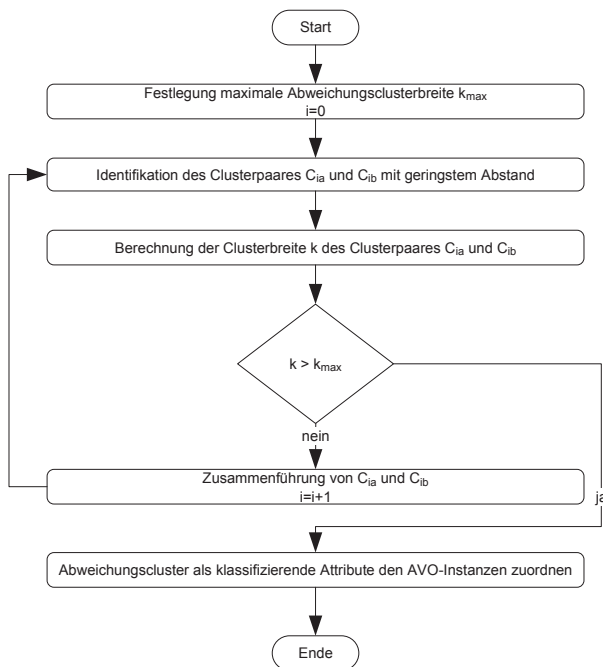


Abbildung 43: Algorithmus zur Segmentierung des transformierten Datensatzes in Abweichungskuster (Darstellung nach DIN 66001)

darstellen. In jedem weiteren Schritt i des Algorithmus wird das Clusterpaar C_{ia} und C_{ib} ($a, b \in \{1, \dots, c_i\}$), welches den geringsten Abstand zueinander aufweist zu einem neuen Cluster zusammengefasst. Zur Bestimmung des Abstands²⁰ zwischen zwei Clustern wird der Abstand der Clusterzentren verwendet:

$$\text{dist}(C_a, C_b) = \left\| \frac{1}{\|C_a\|} \sum_{\tau \in C_a} \tau - \frac{1}{\|C_b\|} \sum_{\tau \in C_b} \tau \right\| \quad (36)$$

Dieser Vorgang wird so lange wiederholt, bis entweder alle DLZ-Anteil-Instanzen zu einem Cluster zusammengefasst sind oder das zuvor definierte Abbruchkriterium erreicht ist. In diesem Fall erfolgt keine Zusammenführung des zuletzt betrachteten Clusterpaares C_{ia} und C_{ib} . Die zu diesem Zeitpunkt vorlie-

²⁰ Weitere Möglichkeiten für die Abstandsbestimmung sind u. a. Single Linkage, Complete Linkage und Average Linkage (RUNKLER 2010).

genden Cluster stellen im Weiteren die Abweichungskluster dar und sind das finale Ergebnis der Segmentierung.

Mit dem Abschluss der Clusteranalyse wird die zum Ende vorliegende Zuordnung von Abweichungsklustern den einzelnen DLZ-Anteil-Instanzen als zusätzliches *klassifizierendes Attribut* hinzugefügt. Der um die Abweichungsklusterzuordnung ergänzte Datensatz stellt die Grundlage für die nachfolgende Klassifikation dar.

Klassifikation der produktionszustands- bzw. auftragsfolgebeschreibenden Attribute

Das Ziel der Klassifikation innerhalb des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung ist es, den im Rahmen der Segmentierung klassifizierten Datensatz hinsichtlich des Einflusses des Produktionszustandes sowie der Auftragsfolge auf die Abweichungskluster zu untersuchen. Der Einfluss der einzelnen produktionszustands- und auftragsfolgebeschreibenden Attribute auf das Zielattribut, hier das Abweichungsverhältnis τ der DLZ-Anteil-Instanzen, und damit auf die Zuordnung der Abweichungskluster, wird mit hierarchischen Klassifikatoren beschrieben. Diese bieten die Möglichkeit, die Attribute in der Reihenfolge der Wichtigkeit zu überprüfen²¹. Zur hierarchischen Strukturierung der Attribute werden im System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung binäre Entscheidungsbäume²² verwendet (vgl. Abbildung 44). Die Blattknoten repräsentieren die produktionszustands- und auftragsfolgebeschreibenden Attribute. Die Kanten stehen für deren Attributwerte und die Blätter entsprechen den zuvor identifizierten Abweichungsklustern.

Der im Rahmen des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung verwendete Algorithmus zur Klassifikation ist in Abbildung 45 dargestellt. Dieser hat die Aufgabe, einen Entscheidungsbaum auf Basis des klassifizierten transformierten Datensatzes aufzubauen, welcher dann besonders effizient zur Erkenntnisfindung durchlaufen werden kann. Hierzu wird beim Aufbau des Baumes jeweils dasjenige produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibende

²¹ Andere gängige Klassifikationsverfahren (z. B. häufigkeitsbasiert, prototypbasiert oder linear) betrachten alle Attribute des Objektes gleichzeitig (RUNKLER 2010).

²² Nach ROKACH & MAIMON (2008) dienen Entscheidungsbäume der strukturierten Darstellung von Entscheidungsregeln. Sie bestehen aus Blattknoten, die die Attribute repräsentieren, sowie Kanten, die für die Attributwerte bzw. Attributwertbereiche stehen. Ein Blatt entspricht einer Klasse (ESTER & SANDER 2000).

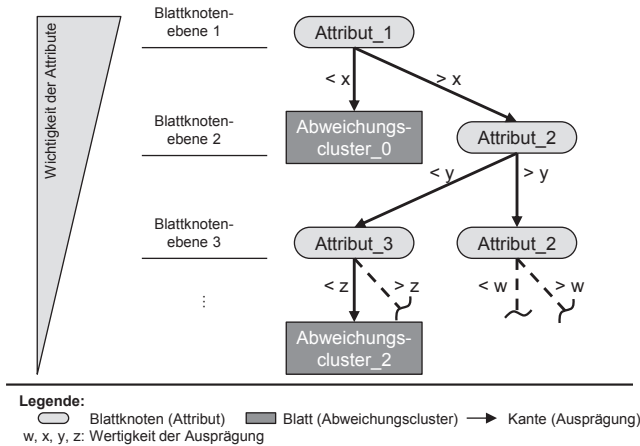


Abbildung 44: Klassifikation der produktzustands- und auftragsfolgebeschreibenden Attribute durch einen binären Entscheidungsbaum

Attribut j mit dem höchsten Informationsgewinn $G_j(Z)$ für den betrachteten Blattknoten gewählt. Dieses wird aus der Menge $Z(X, y)$ mit $X \subset \mathbb{R}^p, y \subset \{1, \dots, c\}$ bestimmt, welche alle an diesem Knoten möglichen Attribut-Vektoren enthält. Die darin zugehörigen Abweichungscluster treten in einer gewissen Wahrscheinlichkeit p auf, die aus den in y enthaltenen Abweichungsclustern berechnet werden kann. Die Wahrscheinlichkeit für einen Abweichungscluster A beträgt folglich (mit $X_{Aj} = \{x \in X | x^{(j)} = A\}, j = 1, \dots, p$):

$$p(y = A) = \frac{\|y_A\|}{\|X\|} \tag{37}$$

Die im betrachteten Knoten in der Menge $Z(X, y)$ enthaltene Information wird über die Entropie²³ bestimmt:

$$H(Z) = - \sum_{A=1}^c p(y = A) \log_2 p(y = A) = - \sum_{A=1}^c \frac{\|y_A\|}{\|X\|} \log_2 \frac{\|y_A\|}{\|X\|} \tag{38}$$

²³ Nach SHANNON & WEAVER (1976) stellt die Entropie ein Maß für die Unsicherheit einer Wahrscheinlichkeitsverteilung dar.

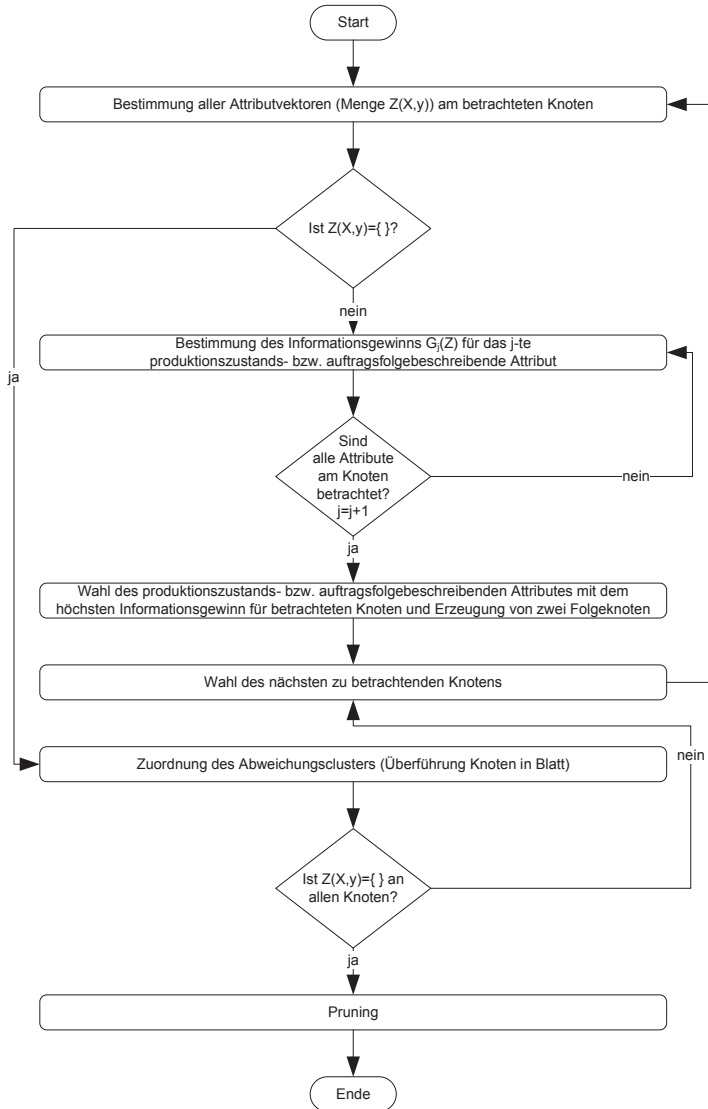


Abbildung 45: Algorithmus zur Klassifikation der produktionszustands- und auftragsfolgebeschreibenden Attribute (Darstellung nach DIN 66001)

Hierbei gilt für jeden Knoten, dass alle Folgekanten die gleiche Attributausprägung berücksichtigen. Dabei sei der Wertebereich $x^{(j)} \in \{1, \dots, v_j\}$ mit der Knotenanzahl $v_j \in \{1, 2, \dots\}$ diskret. Infolge Formel (38) lässt sich bei Traversierung der k -ten Kante ($k \in \{1, \dots, v_j\}$) die Information $H(Z_{kj})$ bestimmen. Als Wahrscheinlichkeit für die Traversierung der k -ten Kante ergibt sich:

$$p(x^{(j)} = k) = \frac{\|X_{kj}\|}{\|X\|} \quad (39)$$

Damit lässt sich der entstehende Informationsgewinn $G_j(Z)$ des produktionszustands- oder auftragsfolgebeschreibende Attributs j am betrachteten Knoten wie folgt bestimmen:

$$G_j(Z) = H(Z) - \sum_{k=1}^{v_j} p(x^{(j)} = k) H(Z_{kj}) = H(Z) - \sum_{k=1}^{v_j} \frac{\|X_{kj}\|}{\|X\|} H(Z_{kj}) \quad (40)$$

Ist das Attribut mit dem höchsten Informationsgewinn identifiziert, wird dieses für den betrachteten Knoten ausgewählt und zwei Folgeknoten werden mit der zugehörigen Attributausprägung angefügt. Dieses Vorgehen wird solange für alle Knoten fortgeführt, bis am betrachteten Knoten die Menge der Attributvektoren leer ist. In diesem Fall ist durch die höherliegenden Attributvektoren eine eindeutige Klassifikation auf das zugehörige Abweichungscluster gegeben. Anstelle des Knotens wird nun das Abweichungscluster angeordnet. Wenn alle außenliegenden Blattknoten durch die entsprechenden Abweichungscluster ersetzt wurden, ist der Aufbau des Entscheidungsbaumes beendet.

Zur Reduktion des Klassifikationsfehlers erfolgt im Anschluss an den Aufbau des gesamten Entscheidungsbaumes das sog. *Pruning*, welches überflüssige Äste des Baumes entfernt und so zu qualitativ hochwertigen Klassifikatoren führt. In der vorliegenden Anwendung ist es unklar, wie viele Daten tatsächlich für die Klassifikation einzelner DLZ-Anteil-Arten vorliegen. Daher bietet es sich an, ein Pruning-Verfahren zu wählen, welches keine Aufteilung der zur Verfügung stehenden Daten in eine Trainings- und eine Testmenge erfordert, um einen maximalen Erkenntnisgewinn zu haben. Das Minimale Kostenkomplexitäts-Pruning erfüllt diese Anforderungen, da es nur eine Trainingsmenge erfordert. Dabei wird als Qualitätskriterium eine gewichtete Summe aus dem Klassifikationsfehler in Bezug zur Größe des Baumes verwendet. Da das Pruning kein Kernelement dieser Arbeit darstellt, sei an dieser Stelle für weiterführende Informationen z. B. auf BREIMAN ET AL. (1984) verwiesen.

Erzeugung des ressourcen- bzw. auftragsfolgebezogenen Produktionswissens in regelbasierter Form

Der letzte Schritt der Erzeugung des regelbasierten Produktionswissens stellt die Überführung des beschnittenen Entscheidungsbaumes in eine regelbasierte Form dar. Dies erfolgt durch die Formulierung von Prämissen wie auch Konklusionen (vgl. Abschnitt 2.6.2.3) für jeden einzelnen Blattknoten. Auch hier werden in Folge der absteigenden Wichtigkeit die einzelnen Attribute je Blattknotenebene angeordnet. In Abbildung 46 ist die Struktur eines binären Entscheidungsbaumes sowie dessen textuelle Beschreibung als Regel beispielhaft für die DLZ-Anteil-Art „Bearbeitung“ eines Fertigungsmittels dargestellt.

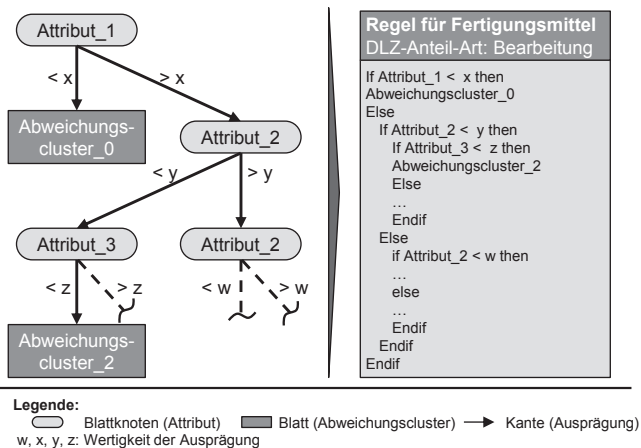


Abbildung 46: Regelbasiertes Produktionswissen in Form eines Entscheidungsbaums (links) und in textueller Darstellung (rechts)

Das regelbasierte Produktionswissen kann somit in der Maschinenbelegungsplanung innerhalb des wissensbasierten Systems verwendet werden (vgl. Abschnitt 6.4.4). Die Regelanwendung führt dabei zu einer Multiplikation der Dauer des betrachteten DLZ-Anteils entsprechend des jeweils mittleren Abweichungsverhältnisses der Abweichungscluster.

Das Ergebnis der Funktion *Ableitung Produktionswissen* ist die Erweiterung der drei Datenmodelle um Produktionswissen in fall- und regelbasierter Form, welches in den produktspezifischen Auftragsdaten implizit vorhanden ist. Hierbei wird das Auftragsmodell um die Instanz der Klasse Arbeitsvorgangsbezogenes

Produktionswissen, welches das DLZ-Anteil- und auftragsfolgebezogene Produktionswissen einschließt, ergänzt. Das Ressourcenmodell wird um das ressourcenbezogene Produktionswissen sowie das Produktionsmodell um das allgemeine Produktionswissen erweitert.

5.5 Zusammenfassung und Fazit

Innerhalb des vorliegenden Kapitels wurde vertieft auf die produktspezifischen Auftragsdaten eingegangen. In diesem Rahmen wurde in Abschnitt 5.2 ein Datenmodell für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung vorgestellt, welches eine Datendurchgängigkeit von der Planung der Maschinenbelegung über die Datenaufnahme im Produktionsprozess bis hin zur Datenanalyse und Stammdatenbereitstellung ermöglicht. Das entwickelte Datenmodell baut auf anerkannten Normen und Richtlinien (u. a. VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1, DIN 8580) auf und besteht aus den drei Teilmodellen Auftragsmodell, Ressourcenmodell und Produktionsmodell. Das Auftragsmodell stellt den Kern des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung dar. Es dient dazu, die Plan- und Ist-Daten von Produktionsaufträgen strukturiert zu verwalten und entsprechend für Analysetätigkeiten bereitzustellen. Dies beinhaltet die Zuordnung eines Produktionszustandes je Arbeitsvorgang, unterteilt in die vier elementaren DLZ-Anteile, sowie die Beschreibung der technischen Daten, welche die Anforderungen des Produktes repräsentieren. Demgegenüber dient das Ressourcenmodell zur Modellierung von Fähigkeiten und Konfiguration von Betriebsmitteln. Hierbei werden die nach VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1 relevanten Betriebsmittelarten berücksichtigt, welche im Produktionsmodell eingebunden werden können, um eine Produktionslandschaft in digitaler Form abzubilden. Dies ermöglicht eine aktuelle Repräsentation der zur Verfügung stehenden Betriebsmittel und stellt die Grundlage für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung dar. Überdies beinhalten alle drei Datenmodelle die Möglichkeit, Produktionswissen in fall- und regelbasierter Form bereitzustellen, welches im Planungsprozess Verwendung findet.

In Abschnitt 5.3 wurde das entwickelte System zur Offline-Betriebsdatenerfassung beschrieben. Durch den Einsatz von intelligenten Produkten sowie eines ganzheitlichen Sensornetzwerkes werden im Produktionsprozess Zeitstempel erfasst. Hierbei findet das Verfahren der Zeitpunktbuchung Anwendung, welches an die vorliegenden Rahmenbedingungen angepasst wurde. Des Weiteren wurde ein Kennzahlensystem zur Bewertung des Produktionszustandes vorgestellt. Die-

ses basiert vornehmlich auf dem VDMA-Einheitsblatt 66412-1, welches betriebswirtschaftliche Kennzahlen für den Einsatz von MES zusammenfasst. Durch die in der Industrie weit verbreitete Anwendung dieser Kennzahlen, bildet das vorgestellte Kennzahlensystem eine anerkannte und einheitliche Beschreibung des Produktionszustandes auf Basis von Zeitwerten.

Die Analyse der produktspezifischen Auftragsdaten wurde in Abschnitt 5.4 behandelt. In diesem Kontext wurden zwei unterschiedliche Funktionen beschrieben, um zum einen die epistemische Datenunsicherheit durch ein gesteigertes Wissen zu reduzieren und zum anderen die aleatorische Datenunsicherheit in einem ausreichenden Maße zu berücksichtigen und so die Qualität der Planungsparameter zu steigern. Auf der einen Seite ist dies die Funktion *Bereitstellung Stammdaten*, die auf Basis der produktspezifischen Auftragsdaten die Zeitparameter der einzelnen DLZ-Anteile als Wahrscheinlichkeitsverteilungen dem Planungssystem zur Verfügung stellt. Dies beinhaltet eine kontinuierliche Anpassung des Zeitparameters an die Bedingungen in der Produktionsebene und lässt zudem eine individuelle Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren und damit der aleatorischen Datenunsicherheit zu. Auf der anderen Seite ist es die Aufgabe der Funktion *Ableitung Produktionswissen*, implizit vorliegende Zusammenhänge innerhalb der produktspezifischen Auftragsdaten zu identifizieren und in fall- sowie regelbasierter Form dem Planungssystem bereitzustellen. Hierbei erfolgt eine Unterscheidung in DLZ-Anteil-bezogenes, ressourcenbezogenes, auftragsfolgebezogenes und allgemeines Produktionswissen.

6 Wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung

6.1 Übersicht

Das vorliegende Kapitel beinhaltet den strukturellen Aufbau und die Funktionsweise der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung, welche das zentrale Element der vorliegenden Arbeit darstellt. Das Planungssystem hat zur Aufgabe, die Maschinenbelegung entsprechend des zu erwartenden Produktionszustandes sowie weiterer impliziter Zusammenhänge (z. B. Auftragsfolge) mit Hilfe des zuvor erworbenen fall- wie auch regelbasierten Produktionswissens festzulegen und damit die Qualität des Planungsergebnisses zu erhöhen. Das in Abschnitt 5.2 vorgestellte generische Datenmodell, bestehend aus den Teilmodellen *Auftragsmodell*, *Ressourcenmodell* und *Produktionsmodell*, dient als Basis zur strukturierten Abbildung aller relevanten Informationen, die im Kontext der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung notwendig sind. Diese stammen zum einen aus dem in Abschnitt 5.3 beschriebenen Vorgehen zur Aufnahme produktspezifischer Auftragsdaten sowie der darauf stattfindenden Bewertung des Produktionszustandes. Zum anderen stellen die im Rahmen der Analyse der produktspezifischen Auftragsdaten abgeleiteten Stammdatenanpassungen als auch das fall- wie auch regelbasierte Produktionswissen die Grundlage für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung dar (vgl. Abschnitt 5.4).

Im vorliegenden Kapitel wird auf den Ablauf der wissensbasierten Maschinenbelegung (vgl. Abschnitt 6.3) sowie auf die hierzu notwendigen Systemelemente (vgl. Abschnitt 6.2) und die drei darin abgebildeten Funktionen (vgl. Abschnitt 6.4) vertieft eingegangen.

6.2 Systemelemente der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

Die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung besteht im Wesentlichen aus zwei Systemelementen. Diese sind das Planungssystem und das wissensbasierte System zur Adaption von DLZ-Anteilen sowie die jeweils zugehörige Datenverwaltung wie auch Schnittstellen zu weiteren Systemen (vgl. Abbildung 47).

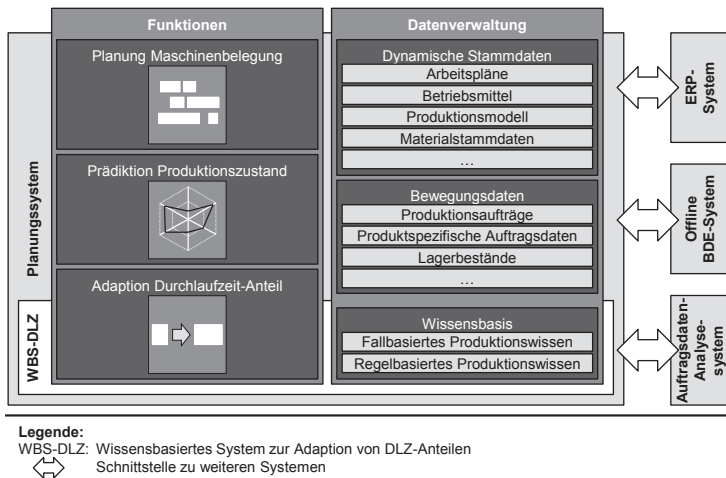


Abbildung 47: Systemelemente der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

Im Verlauf dieses Abschnitts werden zum einen das Planungssystem und zum anderen das wissensbasierte System zur Adaption von DLZ-Anteilen beschrieben.

Planungssystem

Das Planungssystem hat zur Aufgabe, die Produktionsaufträge auf die zur Verfügung stehenden Betriebsmittel zu terminieren (vgl. Abschnitt 6.4.2). Um den Anforderungen hinsichtlich *Flexibilität* und *Adaptivität* (vgl. Abschnitt 3.5) nachzukommen, basiert das Planungssystem auf einer dynamischen Stammdatenbasis. Darin enthalten sind zum einen Arbeitspläne, deren Zeitparameter durch Wahrscheinlichkeitsverteilungen repräsentiert und kontinuierlich auf Basis von Ist-Daten aktualisiert werden (vgl. Abschnitt 5.4.2.2). Zum anderen sind Betriebsmittel mit ihrer aktuellen Konfiguration sowie deren Einbindung in das Produktionsmodell (vgl. Abschnitt 5.2.5) modelliert, welches ein aktuelles Abbild der Produktionsebene darstellt. Zur Erfüllung der Anforderung hinsichtlich *Prognose* (vgl. Abschnitt 3.5), sind zwei besondere Eigenschaften des Planungssystems, die Prädiktion des zukünftigen Produktionszustandes (vgl. Abschnitt 6.4.3) und die Fähigkeit, auch implizit vorliegendes Produktionswissen (vgl. Abschnitt 6.4.4) im Planungsprozess berücksichtigen zu können, notwendig. Zum Austausch erforderlicher Daten weist das Planungssystem zu weiteren Systemen

Schnittstellen auf. Hierbei handelt es sich um das ERP-System, welches die Produktionsaufträge übermittelt, das Analysesystem (vgl. Abschnitt 5.4), welches die dynamischen Stammdaten wie auch die Wissensbasis für das WBS bereitstellt und das Offline-BDE-System (vgl. Abschnitt 5.3). Zudem existiert eine interne Schnittstelle zum wissensbasierten System zur Adaption von DLZ-Anteilen infolge des prädictiv bestimmten Produktionszustandes.

Wissensbasiertes System zur Adaption von Durchlaufzeit-Anteilen

Der schematische Aufbau des wissensbasierten Systems zur Adaption von DLZ-Anteilen, welches innerhalb des Planungssystems angeordnet ist, ist in Abbildung 48 dargestellt.

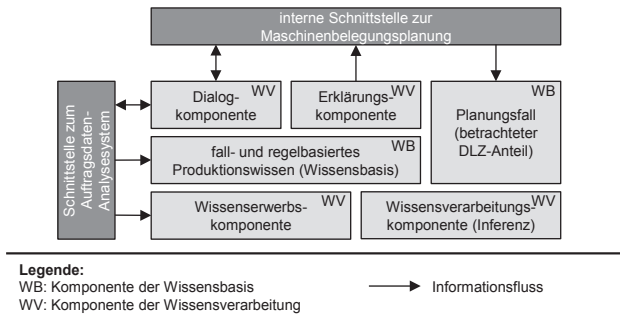


Abbildung 48: Schematischer Aufbau des wissensbasierten Systems zur Adaption von DLZ-Anteilen innerhalb des Planungssystems

Gemäß der in Abschnitt 2.6.2 beschriebenen Architektur von wissensbasierten Systemen, besteht das hier entwickelte WBS aus den äquivalenten Elementen. Der Wissenserwerb erfolgt über eine Schnittstelle zum Auftragsdaten-Analysesystem. Über diese findet der Aufbau der fall- sowie regelbasierten Wissensbasis statt. Das *fallbasierte Produktionswissen* ist repräsentiert durch Instanzen der Klasse DLZ-Anteil (vgl. Abschnitt 5.2.3) von abgeschlossenen und bewerteten Produktionsaufträgen. Formal besteht ein DLZ-Anteil-Fall f aus einer Zuordnung von identifizierenden, produktionszustandsbeschreibenden und lösungsbeschreibenden Attributen. Demgegenüber beinhaltet das *regelbasierte Produktionswissen* allgemeine sowie spezifische Regeln, welche sich auf Abweichungsverhältnisse der Dauer von DLZ-Anteilen beziehen (vgl. Abschnitt 5.4.2.3). Den Kern des WBS stellt die Wissensverarbeitungskomponente dar. Darin sind nur die ersten beiden Schritte des Zyklus des fallbasierten Schließens

(vgl. Abschnitt 2.6.2.3) berücksichtigt. Dies ist darin begründet, da die gefundene Lösung nicht als neu erlernter Fall der Wissensbasis zugeführt wird, weil die Wissensbasis über frühere Fälle und abgeleitete Regeln kontinuierlich erweitert wird. Das WBS erfüllt damit die Aufgabe, die Dauer der übergebenen DLZ-Anteile, auf Grundlage der Wissensbasis, an die zu erwartenden Bedingungen anzupassen und dies der Maschinenbelegungsplanung zu kommunizieren. Für den Datenaustausch wird jeweils die interne Schnittstelle zur Maschinenbelegungsplanung genutzt. Der zugrundeliegende Ablauf wird im Rahmen der Funktion *Adaption Durchlaufzeit-Anteil* in Abschnitt 6.4.4 beschrieben.

6.3 Ablauf der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

Die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung erfolgt entsprechend des in Abbildung 49 dargestellten Algorithmus. Das Ziel liegt dabei auf der Erstellung eines realistischen Ablaufplanes, der mit einer hohen Wahrscheinlichkeit in der

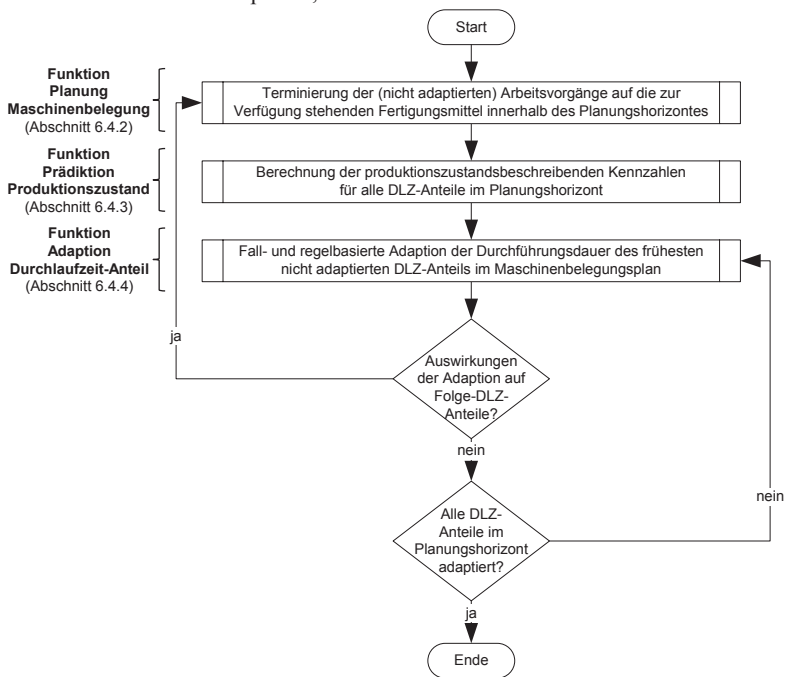


Abbildung 49: Algorithmus der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung
(Darstellung nach DIN 66001)

geplanten Form in der Produktion umgesetzt wird, wengleich dieser nicht unbedingt einen optimalen, jedoch einen aktiven Maschinenbelegungsplan²⁴ darstellt.

Zu diesem Zweck werden zwei nicht-optimierende Verfahren derart miteinander verknüpft, dass ein Maschinenbelegungsplan mit einer hohen Planungsqualität in einer adäquaten Berechnungszeit erzeugt wird. Zum einen wird ein konventioneller, auf Prioritätsregeln basierender Algorithmus eingesetzt, um die Produktionsaufträge auf die zur Verfügung stehenden Fertigungsmittel für den betrachteten Planungshorizont zu terminieren. Hierbei werden die sich kontinuierlich aktualisierenden Zeitparameter der einzelnen DLZ-Anteile unter Berücksichtigung des spezifischen Sicherheitsaufschlags Δt_s verwendet (vgl. Abschnitt 5.4.2.2). Dies ist in der Funktion *Planung Maschinenbelegung* (vgl. Abschnitt 6.4.2) umgesetzt. Zum anderen erfolgt durch die Verwendung eines Verfahrens der Künstlichen Intelligenz, hier ein speziell entwickeltes wissensbasiertes System, eine Adaption²⁵ der Dauer der zuvor eingeplanten DLZ-Anteile gemäß sowohl des jeweils prognostizierten Produktionszustandes (Funktion *Prädiktion des Produktionszustandes* (vgl. Abschnitt 6.4.3)) als auch auftragsfolgebezogener Zusammenhänge. Dies findet auf Basis des fall- und regelbasierten Produktionswissens (vgl. Abschnitt 5.4.2.3), welches aus den produktspezifischen Auftragsdaten extrahiert wurde, statt und ist in der Funktion *Adaption Durchlaufzeit-Anteil* (vgl. Abschnitt 6.4.4) umgesetzt. Die zeitliche Adaption eines DLZ-Anteils beinhaltet die Möglichkeit, dass davon weitere im Maschinenbelegungsplan terminierte DLZ-Anteile beeinflusst werden. Zum einen betrifft dies DLZ-Anteile, welche auf dem gleichen Fertigungsmittel geplant sind und aufgrund der Veränderung der Dauer des betrachteten DLZ-Anteiles verschoben werden müssen. Zum anderen sind hiervon DLZ-Anteile des gleichen Auftrages betroffen, welche sich in der organisatorischen Folge nach dem betrachteten DLZ-Anteil befinden und nicht zum terminierten Zeitpunkt durchgeführt werden können. Da eine zeitliche Verschiebung von weiteren DLZ-Anteilen als Folge einer Adaption des betrachteten DLZ-Anteils zum einen den Maschinenbelegungsplan verzerrt und damit verfälscht und zum anderen der darauf bestimmte Produktionszustand nicht mehr

²⁴ Bei einem aktiven Ablaufplan ist das Vorverlegen irgendeines Arbeitsvorganges nicht möglich, ohne den Beginn mindestens einer anderen Operation zu verzögern. In der Menge aller aktiven Ablaufpläne existiert immer mindestens ein Ablaufplan, der in Bezug auf die festgelegten regulären Kriterien optimal ist (SCHWINDT 1994).

²⁵ Unter *Adaption* wird hierbei der Vorgang verstanden, „eine (vorgeschlagene) Lösung, die sich als nicht ganz richtig für eine (gegebene) Problembeschreibung erweist, so zu manipulieren, dass sie besser zu dem Problem passt“ (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008, S. 199).

korrekt ist, ist es in diesem Fall erforderlich, eine erneute Terminierung der bis dahin nicht überprüften und adaptierten DLZ-Anteile der Arbeitsvorgänge durchzuführen. Nachdem alle DLZ-Anteile, welche sich im Planungshorizont befinden, überprüft und gegebenenfalls adaptiert wurden, ist die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung abgeschlossen und ein Belegungsplan entsprechend des zu erwartenden Produktionszustandes und weiterer impliziter Zusammenhänge erstellt. Die drei zugrundeliegenden Funktionen werden in Abschnitt 6.4 vertieft beschrieben.

6.4 Funktionen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

6.4.1 Übersicht

Die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung wird durch drei Funktionen realisiert. Hierbei handelt es sich um die *Planung der Maschinenbelegung* (vgl. Abschnitt 6.4.2), die *Prädiktion des Produktionszustandes* (vgl. Abschnitt 6.4.3) und die *Adaption der Durchlaufzeit-Anteile* (vgl. Abschnitt 6.4.4), die im Weiteren dieses Abschnittes betrachtet werden.

6.4.2 Funktion Planung Maschinenbelegung

Die Funktion *Planung Maschinenbelegung* hat die Terminierung der vom ERP-System übermittelten Produktionsaufträge auf die zur Verfügung stehenden Fertigungsmittel zur Aufgabe. Der entwickelte Algorithmus zur Terminierung von Arbeitsvorgängen im Rahmen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung ist in Abbildung 50 dargestellt und lässt sich in zwei Bereiche aufteilen. Wird der Algorithmus zum ersten Mal im Rahmen der Maschinenbelegungsplanung durchlaufen, ist es notwendig, einmalig die hierzu erforderliche Datengrundlage zu erzeugen. Dabei werden diejenigen Fertigungsmittel identifiziert, welche die Fähigkeit besitzen, die in den Produktionsaufträgen enthaltenen Arbeitsvorgänge durchzuführen. Dies ist erforderlich, um nur diejenigen Produktionsaufträge auf die Fertigungsmittel einzuplanen, welche sowohl produktions- als auch materialtechnisch herstellbar sind. Die Zuordnung der Arbeitsvorgänge zu den Fertigungsmitteln entfällt bei allen weiteren Durchläufen des Algorithmus im Rahmen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung und beginnt damit im zweiten Bereich. Hier findet die Zuweisung von Arbeitsvorgängen zu Fertigungsmitteln

6.4 Funktionen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

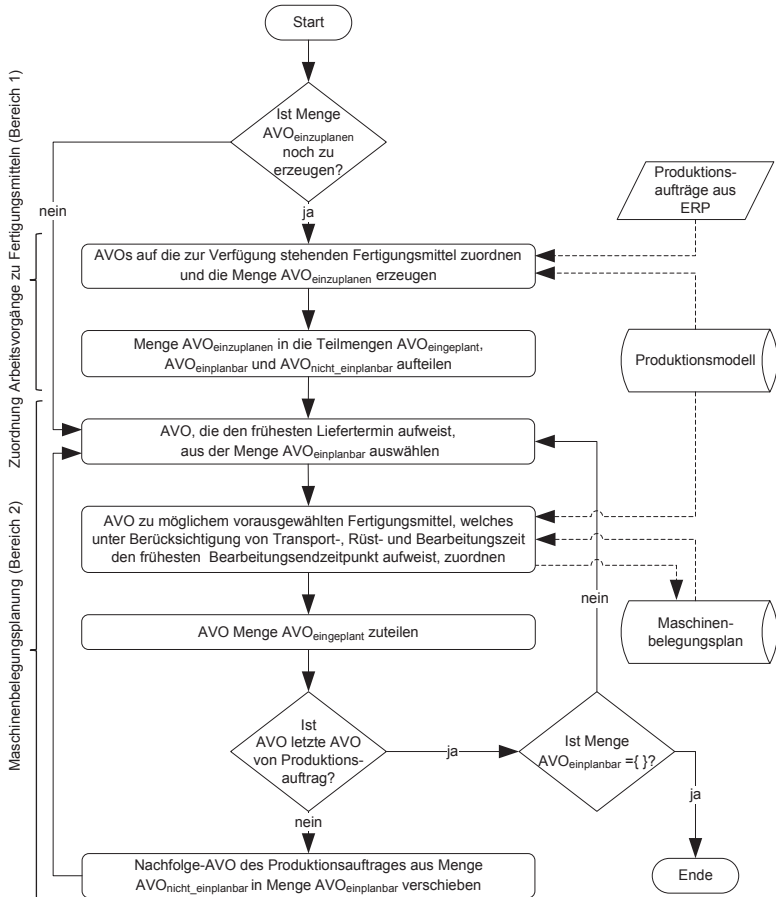


Abbildung 50: Algorithmus zur Terminierung von Arbeitsvorgängen im Rahmen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung mit FLT-Regel (Darstellung nach DIN 66001)

unter Berücksichtigung der technologischen als auch organisatorischen Folge der Aufträge wie auch des zugrundeliegenden Zielsystems statt und endet, wenn alle DLZ-Anteile auf die zur Verfügung stehenden Fertigungsmittel terminiert sind.

Im Fortgang werden die beiden genannten Bereiche detailliert beschrieben, die als Ergebnis den Maschinenbelegungsplan erzeugen und hierzu die dynamischen Stammdaten verwenden.

Zuordnung Arbeitsvorgänge zu Fertigungsmitteln

Die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Fertigungsmitteln erfolgt erst unmittelbar vor der Maschinenbelegungsplanung und nicht bereits in der Arbeitsplanung. Auf diese Weise lässt sich die beschriebene erforderliche Flexibilität hinsichtlich Produktausprägung sowie Konfiguration der Produktionsebene realisieren und damit alle Veränderungen, die sowohl das Produktionsprogramm als auch die Produktion selbst betreffen, berücksichtigen. Dabei erfolgt eine *Überprüfung der technischen Durchführbarkeit*. Dies entspricht einem formalen Abgleich zwischen den auftragsspezifischen Anforderungen und den ressourcenspezifischen Fähigkeiten. Hierbei werden die technischen Daten hinsichtlich Geometrie (z. B. Arbeitsraum) und Technologie (z. B. Spanen mit geometrisch bestimmter Schneide) der einzelnen Arbeitsvorgänge der Aufträge (vgl. Abschnitt 5.2.3) den technischen Daten der Fertigungsmittel (vgl. Abschnitt 5.2.4), welche im Produktionsmodell enthalten sind, gegenübergestellt. Dies führt zu einer Zuordnung von Fertigungsmitteln zu Arbeitsvorgängen, welche zu deren Bearbeitung eingesetzt werden können. Für den Fall, dass für einen Arbeitsvorgang kein Fertigungsmittel mit den geforderten Fähigkeiten im Produktionsmodell enthalten ist, wird der gesamte Auftrag zurückgestellt. Neben der Überprüfung der technischen Durchführbarkeit erfolgt auch eine *Überprüfung der Material- und Hilfsstoffverfügbarkeit*. Sollte ein notwendiges Material nicht vorhanden sein, wird der zugehörige Auftrag ebenfalls zurückgestellt. Als Ergebnis dieses Schrittes wird die Menge $AVO_{\text{einzuplanen}}$ erzeugt, die alle AVOs der Produktionsaufträge enthält, die sowohl produktions- als auch materialtechnisch herstellbar sind und eine Zuordnung von möglichen Fertigungsmitteln zu Arbeitsvorgängen enthält. Innerhalb des Auftragsmodells werden alternative Fertigungsmittel in Form einer Parallelstruktur der AVO modelliert (vgl. Abschnitt 5.2.2). Hierbei existiert die Unterscheidung, ob sich die alternativen Fertigungsmittel in der gleichen oder einer unterschiedlichen Werkstatt befinden und ggf. neben dem Rüst- und Bearbeitungsvorgang noch weitere DLZ-Anteile (Transportvorgänge) erforderlich sind.

Maschinenbelegungsplanung

Die Terminierung der einzelnen Arbeitsvorgänge der Produktionsaufträge auf die im Produktionsmodell enthaltenen Fertigungsmittel erfolgt auf Basis der Menge $AVO_{\text{einzuplanen}}$, die alle ausführbaren AVOs zusammenfasst. Der hierzu entwi-

ckelte Algorithmus verwendet als Grundlage das *Giffler-Thompson Verfahren der Maschinenbelegung*²⁶.

Im Rahmen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung erfolgt die Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu den Fertigungsmitteln iterativ auf Grundlage einer Zielfunktion, welche durch Prioritätsregeln dargestellt ist. Bei jedem Schritt der Zuordnung wird der Bearbeitungsvorgang der AVO als das führende Element betrachtet und zusätzlich Transport- und Rüstzeiten in der Entscheidungsfindung berücksichtigt und im Belegungsplan eingefügt. Dabei werden drei Arten von Arbeitsvorgängen unterschieden, und zwar eingeplante, einplanbare und noch nicht einplanbare Arbeitsvorgänge. *Eingeplante Arbeitsvorgänge* weisen bereits eine feste Zuordnung der DLZ-Anteile Transport zum Fertigungsmittel, Rüstvorgang und Bearbeitung der AVO auf dem Fertigungsmittel auf. Im Falle der erneuten Terminierung gemäß des in Abschnitt 6.3 beschriebenen Ablaufes der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung stellen alle durch das WBS adaptierten DLZ-Anteile der AVOs eingeplante Arbeitsvorgänge dar und sind somit der Auftragsfolge bereits zugeordnet. Alle eingeplanten Arbeitsvorgänge sind in der Menge $AVO_{eingeplant}$ zusammengefasst. Die *einplanbaren Arbeitsvorgänge* haben den Zustand, dass die jeweilige Vorgänger-Operation des betrachteten Produktionsauftrages bereits eingeplant ist und somit im nächsten Schritt der Zuordnung zu einem Fertigungsmittel berücksichtigt werden. Diese Arbeitsvorgänge sind in der Menge $AVO_{einplanbar}$ zusammengefasst. Demgegenüber stellen *noch nicht einplanbare Arbeitsvorgänge* diejenigen dar, deren Vorgänger-Operationen noch nicht eingeplant sind und die somit einer Zuordnung im nächsten Schritt nicht zur Verfügung stehen. Diese Arbeitsvorgänge gehören der Menge $AVO_{nicht_einplanbar}$ an. In Abbildung 50 ist der entsprechende Algorithmus, realisiert mit einer Frühester-Liefertermin-Regel (FLT-Regel), dargestellt. Grundsätzlich lassen sich hierbei alle Arten und Kombinationen von Prioritätsregeln²⁷ (u. a. Schlupfzeit-, Kürzeste-Operationszeit- und Kürzeste-Restbearbeitungszeit-Regel sowie auch herstellungskostenorientierte Regeln)

²⁶ Das Giffler-Thompson-Verfahren der Maschinenbelegung ist ein heuristisches Eröffnungsverfahren, welches einen aktiven, nicht unbedingt optimalen, Ablaufplan ermittelt. Dies ist zurückzuführen auf die Verwendung von Prioritätsregeln zur Konfliktlösung bei der Zuordnung von Arbeitsvorgängen zu Fertigungsmitteln und der damit einhergehenden Schaffung von lokalen Optima, die nicht zwangsläufig dem globalen Optimum entsprechen (ZÄPFEL & BRAUNE 2005).

²⁷ Eine Übersicht von Prioritätsregeln sowie deren Kombination und die Auswirkung auf die Maschinenbelegung findet sich z. B. bei NEIDHARDT (2007).

verwenden. Hierzu ist es erforderlich, die Schritte zwei und drei des Algorithmus in Abbildung 50 entsprechend zu verändern.

Das Ergebnis der Funktion *Planung Maschinenbelegung* ist ein aktiver Belegungsplan, der alle produktions- und materialtechnisch herstellbaren Produktionsaufträge, welche durch das ERP-System übermittelt wurden, beinhaltet. Die zeitliche Dauer der darin enthaltenen DLZ-Anteile der einzelnen AVOs entspricht hier den in den dynamischen Stammdaten gespeicherten Verteilungsfunktionen sowie den spezifischen Sicherheitszuschlägen.

6.4.3 Funktion Prädiktion Produktionszustand

Die Funktion *Prädiktion Produktionszustand* hat die Bestimmung des zum Zeitpunkt der geplanten Durchführung des betrachteten DLZ-Anteiles vorliegenden Produktionszustandes zur Aufgabe. Dies erfolgt mit Hilfe des in Abschnitt 5.3.3.3 beschriebenen Kennzahlensystems.

Der entsprechende Algorithmus ist in Abbildung 51 dargestellt. Im Gegensatz

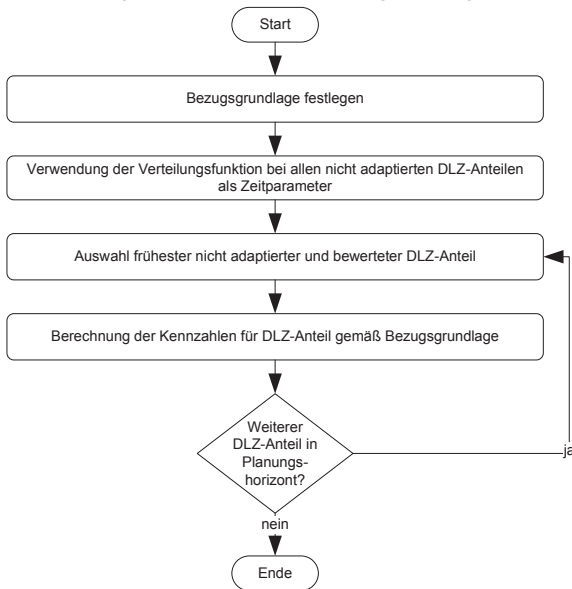


Abbildung 51: Algorithmus zur Prädiktion des Produktionszustandes auf Basis des Maschinenbelegungsplanes (Darstellung nach DIN 66001)

zur Bewertung des Produktionszustandes auf Basis von Ist-Daten erfolgt die Prädiktion des Produktionszustandes auf Grundlage des Maschinenbelegungsplanes. Um eine Vergleichbarkeit des prädiktiv bestimmten und des auf Ist-Daten errechneten Produktionszustandes zu realisieren, ist es erforderlich, die gleiche Bezugsgrundlage zu verwenden. Des Weiteren ist es notwendig, die aleatorische Unsicherheit der einzelnen DLZ-Anteile einzubeziehen, um ein realitätsnahes Verhalten der DLZ-Anteile für die Prädiktion zu erhalten. Daher erfolgt die Prädiktion des Produktionszustandes auf Basis der Verteilungsfunktionen der jeweiligen DLZ-Anteile und nicht auf den Werten des Maschinenbelegungsplanes, da diese zusätzlich noch den Sicherheitsaufschlag beinhalten. Der Bewertungsalgorithmus ist beendet, wenn alle im Planungshorizont enthaltenen DLZ-Anteile um den prädiktiv bestimmten Produktionszustand ergänzt sind.

Das Ergebnis der Funktion *Prädiktion Produktionszustand* ist die Ergänzung aller im Planungshorizont enthaltener DLZ-Anteile um die produktionszustandsbeschreibenden Attribute zum Zeitpunkt der geplanten Durchführung. Der prädiktiv bestimmte Produktionszustand je DLZ-Anteil wird in der jeweiligen Instanz der Klasse Produktionszustand im Auftragsmodell gespeichert.

6.4.4 Funktion Adaption Durchlaufzeit-Anteil

Die Funktion *Adaption Durchlaufzeit-Anteil* hat die Aufgabe, die Dauer von DLZ-Anteilen, welche im Maschinenbelegungsplan terminiert wurden (vgl. Abschnitt 6.4.2), entsprechend des prädiktiv bestimmten Produktionszustandes (vgl. Abschnitt 6.4.3) zu überprüfen und bei Bedarf an die erwarteten Bedingungen anzupassen. Dies erfolgt durch ein wissensbasiertes System, dessen schematischer Aufbau in Abschnitt 6.2 dargestellt ist. Der Algorithmus zur wissensbasierten Adaption von DLZ-Anteilen ist in Abbildung 52 dargestellt und besteht aus vier aufeinander aufbauenden Schritten. Zu Beginn ist der zu adaptierende spezifische DLZ-Anteil im Maschinenbelegungsplan auszuwählen, welcher im Weiteren den sog. Planungsfall f_P darstellt. Zu diesem wird im zweiten Schritt, auf Basis des prädiktiv bestimmten Produktionszustandes, der ähnlichste DLZ-Anteil-Fall f_F im fallbasierten Produktionswissen identifiziert. Dabei wird die Annahme zu Grunde gelegt, dass ähnliche Fälle auch ähnliche Durchlaufzeiten aufweisen. Sollte keine ausreichende Übereinstimmung zwischen dem Planungsfall f_P und dem ähnlichsten DLZ-Anteil-Fall f_F vorliegen, wird dieser im Rahmen des dritten Schrittes durch die Anwendung des regelbasierten Produktionswissens angepasst. Der resultierende adaptierte ähnlichste DLZ-Anteil-

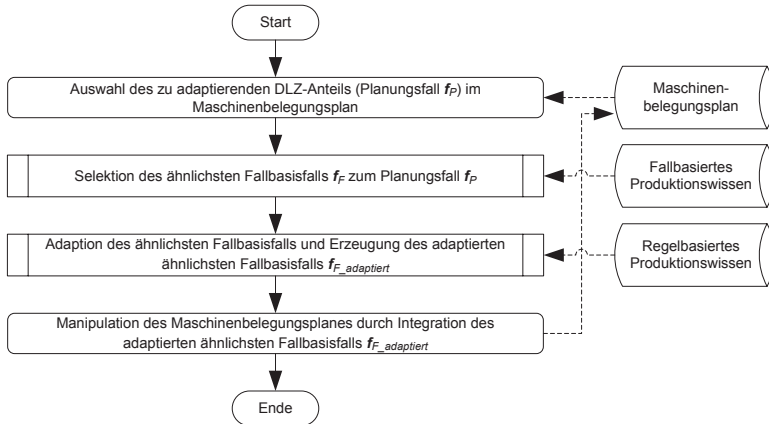


Abbildung 52: Algorithmus zur wissensbasierten Adaption von DLZ-Anteilen
(Darstellung nach DIN 66001)

Fall $f_{F_adaptiert}$ wird im letzten Schritt an die Maschinenbelegungsplanung zurückgegeben und entsprechend im Ablaufplan integriert. Der erste und letzte Schritt finden außerhalb des WBS in der Maschinenbelegungsplanung statt. Die Kommunikation erfolgt jeweils über die interne Schnittstelle zur Maschinenbelegungsplanung.

Die vier Schritte der Wissensverarbeitung zur Adaption von DLZ-Anteilen stellen sich wie folgt dar.

Auswahl zu adaptierender DLZ-Anteil

Für die Adaption des DLZ-Anteils wird jeweils der im Planungshorizont enthaltene früheste, bisher noch nicht adaptierte DLZ-Anteil ausgewählt. Dies liegt darin begründet, dass sich durch die Veränderung der Durchführungsdauer von DLZ-Anteilen Auswirkungen auf Folge-DLZ-Anteile sowohl auf dem gleichen Fertigungsmittel als auch in der Auftragsfolge ergeben können. In diesem Fall ist eine erneute Terminierung der noch nicht adaptierten DLZ-Anteile erforderlich (vgl. Abschnitt 6.3).

In Abbildung 53 ist die Auswahl des frühesten, noch nicht adaptierten DLZ-Anteils exemplarisch visualisiert. Der ausgewählte spezifische DLZ-Anteil stellt im Weiteren den Planungsfall f_P dar, welcher dem WBS zur Überprüfung und Adaption übergeben wird.

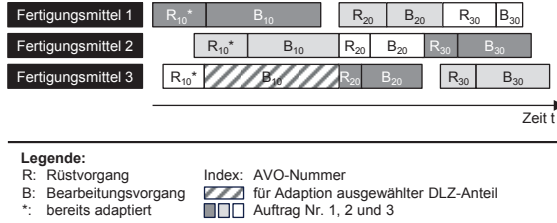


Abbildung 53: Auswahl des Planungsfalls f_p im Maschinenbelegungsplan

Selektion ähnlichster DLZ-Anteil-Fall in fallbasiertem Produktionswissen

Die Selektion des ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls erfolgt in Form eines Vergleichs zwischen dem betrachteten Planungsfall f_p aus dem Maschinenbelegungsplan und den im fallbasierten Produktionswissen (vgl. Abschnitt 5.4.2.3) enthaltenen j früheren DLZ-Anteil-Fällen f_{F_j} des spezifischen DLZ-Anteils. Im System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung wird hierzu die *DLZ-Anteil-Ähnlichkeit* $sim_{DLZ-Anteil}$ als Ähnlichkeitsmaß verwendet. Diese basiert auf der *verallgemeinerten Hamming-Ähnlichkeit*²⁸ und bestimmt sich nach:

$$sim_{DLZ-Anteil}(f_p, f_{F_j}) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i \cdot (1 - |a_{p,N,i} - a_{F_j,N,i}|)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (41)$$

Darin enthalten sind die n normierten produktionszustandsbeschreibenden Attribute $a_{p,N,i}$ des Planungsfalls f_p und $a_{F_j,N,i}$ des j -ten DLZ-Anteil-Falls f_{F_j} , sowie deren spezifische Gewichtungsfaktoren w_i (mit $\sum_{i=1}^n w_i = 1$). Die Gewichtungsfaktoren lassen sich entweder allgemein oder ressourcenspezifisch festlegen, um unterschiedliche Wertigkeiten der produktionszustandsbeschreibenden Attribute zu berücksichtigen. Hierbei kann u. a. die bei der Klassifikation der produktionszustandsbeschreibenden Attribute festgelegte Wichtigkeitsreihenfolge (vgl. Abschnitt 5.4.2.3) herangezogen werden. Die resultierende Gesamthähnlichkeit des Planungs- und DLZ-Anteil-Falls ergibt sich aus der Summe der Ähnlichkeiten der einzelnen produktionszustandsbeschreibenden Attribute und kann Werte von 0 (keine Ähnlichkeit) bis 1 (vollkommene Ähnlichkeit) annehmen. Der Algorithmus zur Selektion des ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls ist in Abbildung 54 dargestellt.

²⁸ Die *verallgemeinerte Hamming-Ähnlichkeit* ist eine Erweiterung der *gewichteten Hamming-Ähnlichkeit* und kann im Gegensatz zu dieser Attribute mit beliebigen Werten beurteilen. Sie basiert auf der *Hamming-Distanz*, welche ein Maß für die Unterschiedlichkeit zwischen Fällen ist und beim maschinellen fallbasierten Schließen eingesetzt wird (BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008, S. 18).

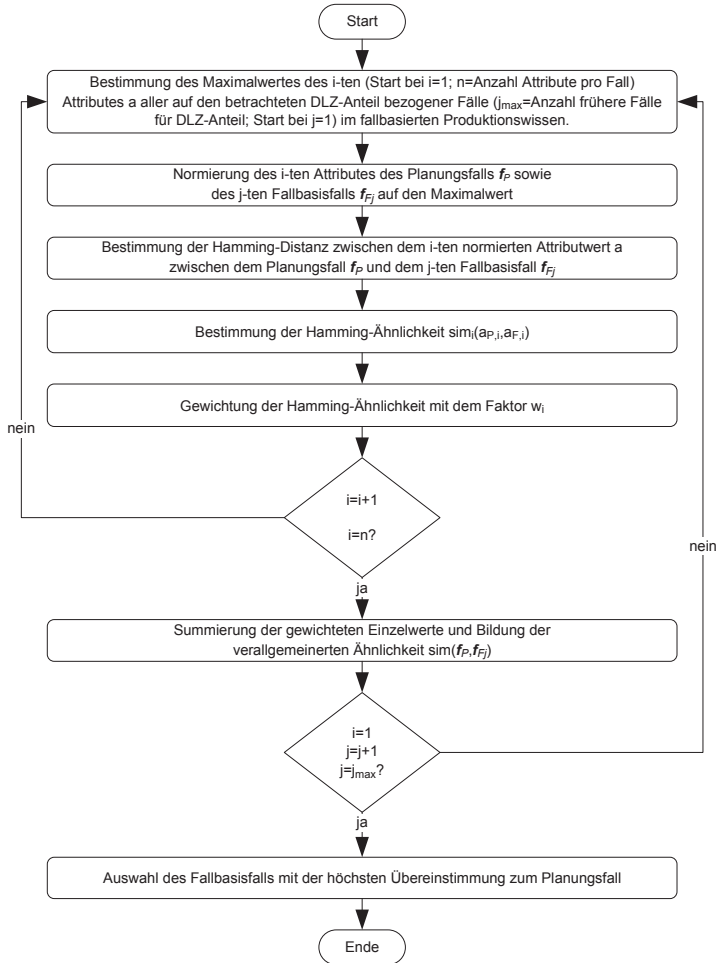


Abbildung 54: Algorithmus zur Selektion des ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls (Darstellung nach DIN 66001)

Zu Beginn wird für das betrachtete produktionszustandsbeschreibende Attribut a_i der Maximalwert $a_{max,i}$ aller DLZ-Anteil-Fälle bestimmt, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen.

$$a_{max,i} = \max_i(a_{P,i}; a_{F_j,i}) \quad (42)$$

Der Maximalwert $a_{max,i}$ wird im darauffolgenden Schritt dazu verwendet, die produktionszustandsbeschreibenden Attribute $a_{P,i}$ und $a_{F_j,i}$ zu Normieren und mit ihnen deren Ähnlichkeit zu bestimmen. Nachdem die resultierende Ähnlichkeit des Attributes a_i mit dem Gewichtungsfaktor beaufschlagt wurde, wird dieser Vorgang für alle n produktionszustandsbeschreibenden Attribute durchgeführt und damit die jeweilige *DLZ-Anteil-Ähnlichkeit* $sim_{DLZ-Anteil}(f_P, f_{F_j})$ bestimmt. Dieser Vorgang wird für alle j DLZ-Anteil-Fälle des fallbasierten Produktionswissens durchgeführt. Der DLZ-Anteil-Fall f_{F_j} , der den höchsten Wert aufweist, stellt den ähnlichsten DLZ-Anteil-Fall zum Planungsfall f_P dar.

Adaption ähnlichster DLZ-Anteil-Fall

Im Rahmen der Adaption des ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls f_F zum betrachteten Planungsfall f_P kommt das regelbasierte Produktionswissen (vgl. Abschnitt

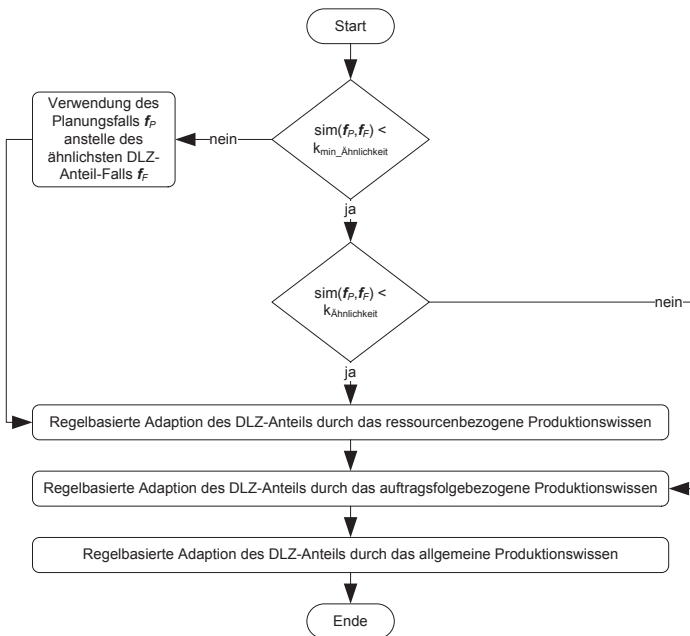


Abbildung 55: Algorithmus zur Adaption des ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls f_F
(Darstellung nach DIN 66001)

5.4.2.3) zur Anwendung. Entsprechend des in Abbildung 55 dargestellten Algorithmus läuft die Adaption des ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls f_F ab. Dieser besteht aus drei Adaptionsschritten, welche zur Anpassung der Dauer des betrachteten DLZ-Anteils die vorwärtsverkettete Inferenz (vgl. Abschnitt 2.6.2.3) verwenden. Zu Beginn des Algorithmus erfolgen zwei Überprüfungen hinsichtlich des Übereinstimmungsgrades zwischen Planungs- und DLZ-Anteil-Fall. Dabei wird zuerst geprüft, ob die minimal erforderliche Ähnlichkeit $k_{min_Ähnlichkeit}$ (z. B. 0,70) gegeben ist und der ähnlichste DLZ-Anteil-Fall f_F somit für den vorliegenden Produktionszustand repräsentativ genug ist. Sollte dies nicht der Fall sein, ist der DLZ-Anteil-Fall f_F , obwohl dieser den Ähnlichsten im fallbasierten Produktionswissen darstellt, nicht verwendbar und ist durch den Planungsfall f_P zu ersetzen. Bei der zweiten Überprüfung wird festgestellt, ob der Planungsfall f_P und DLZ-Anteil-Fall f_F bereits eine ausreichende Übereinstimmung hinsichtlich des Produktionszustandes aufweisen. Die Variable $k_{Ähnlichkeit}$ gibt hierbei den ausreichenden Übereinstimmungsgrad (z. B. 0,95) vor. Sollte keine ausreichende Übereinstimmung vorliegen, (d. h. $sim_{DLZ-Anteil}(f_P, f_F) < k_{Ähnlichkeit}$ mit $0 \leq k_{Ähnlichkeit} \leq 1$) ist dies auf die Abweichung eines oder mehrerer produktionszustandsbeschreibender Attributpaare (inklusive der vorgenommenen Gewichtungen) zurückzuführen und lässt folgern, dass die Ist-Dauer des früheren Falls ebenfalls vom Berechnungsergebnis für den Planungsfall f_P abweicht. Zur Kompensation dieser Abweichung wird das ressourcenbezogene Produktionswissen herangezogen. Durch dessen Anwendung wird auf Basis der produktionszustandsbeschreibenden Attribute ein Abweichungscluster ausgewählt und die Dauer des betrachteten DLZ-Anteils mit dem mittleren Abweichungsverhältnis τ des Abweichungsclusters multipliziert. Liegt jedoch eine ausreichende Übereinstimmung vor (d. h. $sim(f_P, f_F) > k_{Ähnlichkeit}$) besteht die Gefahr, dass durch die Anwendung des ressourcenbezogenen Produktionswissens ein akzeptables Ergebnis verschlechtert wird. Daher wird für diesen Fall dieser Schritt übersprungen. Im nächsten Schritt wird das auftragsfolgebezogene Produktionswissen angewendet und ebenfalls entsprechend des identifizierten Abweichungsclusters (hier für die Auftragsfolge) eine Adaption des DLZ-Anteils vorgenommen. Die nun vorliegende adaptierte Dauer des betrachteten DLZ-Anteils ist die auf Basis des DLZ-Anteil-bezogenen (fallbasiert), ressourcenbezogenen (regelbasiert) und auftragsfolgebezogenen (regelbasiert) Produktionswissens zu erwartende Durchführungszeit. Der letzte Schritt besteht in der Anwendung des allgemeinen Produktionswissens, welches im Vorfeld explizit durch den Anwender vorgegeben wurde. Damit ist die Adaption des ähnlichsten

DLZ-Anteil-Falls abgeschlossen und wird als adaptierter ähnlichster DLZ-Anteil-Fall $f_{F_adaptiert}$ dem Planungssystem übergeben.

Manipulation Maschinenbelegungsplan

Bei der Manipulation des Maschinenbelegungsplanes wird die zeitliche Dauer des betrachteten DLZ-Anteils entsprechend des vom wissensbasierten System zurückgegebenen adaptierten ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls $f_{F_adaptiert}$ verändert (vgl. Abbildung 56). Der betrachtete DLZ-Anteil wird ab diesem Zeitpunkt als adaptiert angesehen und bei einer erneuten Terminierung, im Falle der Beeinflussung eines DLZ-Anteils durch die Veränderung eines anderen DLZ-Anteils (vgl. Abschnitt 6.3), nicht mehr berücksichtigt. Diese Situation ist exemplarisch zudem in Abbildung 56 dargestellt. Dabei wird sowohl der Folge-DLZ-Anteil auf dem gleichen Fertigungsmittel als auch in der Auftragsfolge beeinflusst.

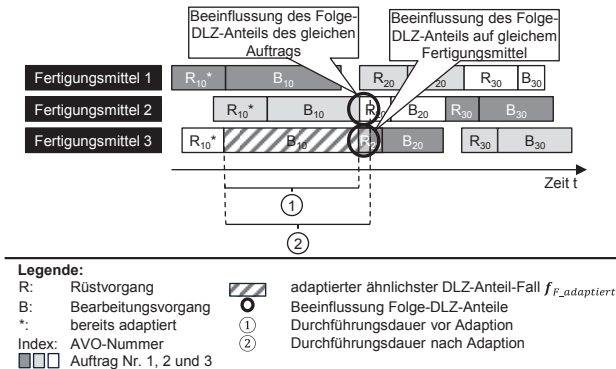


Abbildung 56: Beeinflussung weiterer DLZ-Anteile durch die Integration des adaptierten ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls $f_{F_adaptiert}$

Das Ergebnis der Funktion *Adaption Durchlaufzeit-Anteil* ist die Anpassung der Dauer des betrachteten DLZ-Anteils im Maschinenbelegungsplan durch Anwendung des fall- und regelbasierten Produktionswissens unter Berücksichtigung des zu erwartenden Produktionszustandes.

6.5 Zusammenfassung und Fazit

Im Rahmen des vorliegenden Kapitels wurde die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung beschrieben. Dabei wurden in Abschnitt 6.2 die zugrundeliegenden Systemelemente dargestellt. Dies ist zum einen das Planungssystem zur Terminierung der Produktionsaufträge auf die zur Verfügung stehenden Fertigungsmittel und zum anderen das wissensbasierte System zur Adaption von DLZ-Anteilen. Die jeweils zugehörige Datenverwaltung besteht aus den in Abschnitt 5.4.2.2 beschriebenen dynamischen Stammdaten als auch dem in Abschnitt 5.4.2.3 dargestellten fall- und regelbasierten Produktionswissen.

Der Ablauf der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung unter Verwendung der beschriebenen Systemelemente als auch der zugrundeliegenden Daten wird in Abschnitt 6.3 erläutert. Die Terminierung der Produktionsaufträge auf die zur Verfügung stehenden Betriebsmittel erfolgt unter Berücksichtigung von produktionszustands- sowie auftragsfolgebezogenen Abhängigkeiten, welche im Produktionswissen zur Verfügung gestellt werden. Zu diesem Zweck finden zwei nicht-optimierende Verfahren Anwendung. Zum einen erfolgt die Terminierung der Produktionsaufträge auf die Fertigungsmittel mit Hilfe eines auf Prioritätsregeln basierenden Algorithmus (vgl. Abschnitt 6.4.2). Zum anderen werden auf Basis des prädiktiv bestimmten Produktionszustandes je DLZ-Anteil (vgl. Abschnitt 6.4.3) sowie der auftragsfolgebezogenen Zusammenhänge die DLZ-Anteile mit Hilfe eines wissensbasierten Ansatzes iterativ adaptiert (vgl. Abschnitt 6.4.4). Hierzu wird im Belegungsplan ein sog. Planungsfall ausgewählt. Zu Beginn erfolgt eine Überprüfung, ob zu dessen prädiktiv bestimmtem Produktionszustand ein ausreichend ähnlicher DLZ-Anteil-Fall in der Fallbasis vorhanden ist. Mit Hilfe des regelbasierten Produktionswissens wird dieser noch an weitere Abhängigkeiten angepasst und die Durchführungsdauer im Belegungsplan adaptiert. Nach Überprüfung und Adaption aller DLZ-Anteile liegt ein Maschinenbelegungsplan vor, welcher hinsichtlich des zu erwartenden Produktionszustandes und der auftragsfolgebezogenen Abhängigkeiten eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit aufweist.

7 Umsetzung und Bewertung

7.1 Übersicht

In den Kapiteln 5 und 6 wurden die Elemente des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung beschrieben. Im vorliegenden Kapitel werden deren Umsetzung und Bewertung behandelt. Hierzu erfolgt in Abschnitt 7.2 die Darstellung der prototypischen Umsetzung sowie der verwendeten Validierungsumgebung. Daraufhin werden in Abschnitt 7.3 die Modellierung und die Anwendung des entwickelten Systems beschrieben. Die simulationstechnische Validierung wird in Abschnitt 7.4 dargestellt. Zum Abschluss dieses Kapitels erfolgt in Abschnitt 7.5 noch eine kritische Bewertung hinsichtlich technischer sowie wirtschaftlicher Aspekte.

7.2 Prototypische Umsetzung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

7.2.1 Systemübersicht des Hard- und Software-Demonstrators

Das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung wurde sowohl an einem Hard- als auch Software-Demonstrator implementiert und validiert (vgl. Abbildung 57). Der Hardware-Demonstrator, eine produktionstechnische Versuchsanlage, wurde vornehmlich zur Validierung der Offline-Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten (vgl. Abschnitt 5.3) verwendet und ist in Abschnitt 7.2.2 beschrieben. Aufgrund der Notwendigkeit einer

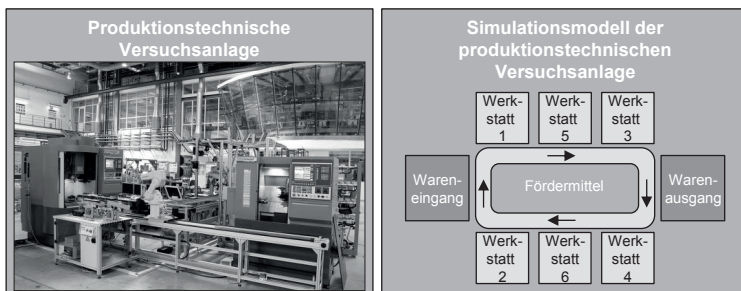


Abbildung 57: Validierungsumgebung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

hohen Anzahl an produktspezifischen Auftragsdaten zur Analyse und Ableitung von Produktionswissen, welches nicht in dem erforderlichen Maße im Hardware-Demonstrator generiert werden konnte, wurde zudem ein Simulationsmodell auf Basis der produktionstechnischen Versuchsanlage erstellt (vgl. Abschnitt 7.2.3). Dies ermöglicht auch Untersuchungen hinsichtlich der dynamisch gestalteten Fertigungsstammdaten, was in einer realen Produktion nicht möglich gewesen wäre. Die Ergebnisse der simulationstechnischen Validierung werden in Abschnitt 7.4 dargestellt und diskutiert.

Der Software-Prototyp des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung wurde in C# mit der Software *Microsoft Visual Studio*® 2010 entwickelt. Dieser besteht aus den drei Systemelementen *Offline-Betriebsdatenerfassungssystem*, *Auftragsdaten-Analysesystem* und *Wissensbasiertes Planungssystem* (vgl. Abbildung 58). Darin sind jeweils die in Kapitel 5 und 6 beschriebenen Funktionen umgesetzt.

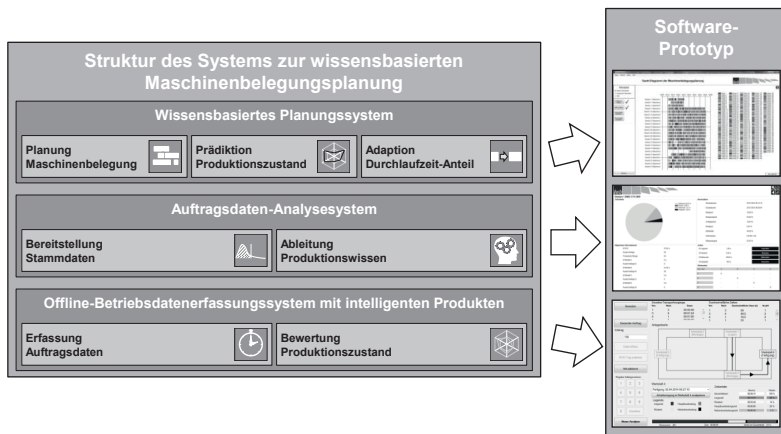


Abbildung 58: Umsetzung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung in einem Software-Prototyp

Des Weiteren wurden mit den Softwareprodukten *RapidMiner Studio*® Version 6, *Visual-XSel*® Version 12.1 sowie *Microsoft Excel*® und *Access*®, jeweils Version 2010, Datensätze bearbeitet, analysiert und für die Verwendung innerhalb des entwickelten Systems bereitgestellt.

7.2.2 Produktionstechnische Versuchsanlage

Die Umsetzung und Validierung der technischen Elemente des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung, vornehmlich die Offline-Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten, erfolgte an einer produktionstechnischen Versuchsanlage. Diese besteht aus realen Bestandteilen einer industriellen Produktion. Dabei handelt es sich um ein flexibles Fertigungssystem, welches sich aus den folgenden Elementen zusammensetzt: Zwei Werkstätten zur Fertigung mit je einer CNC-Drehmaschine und einer CNC-Fräsmaschine sowie einem Roboter auf einer Linearachse zum Beladen der Maschinen, zwei Werkstätten für die Montage sowie einem Lager. Materialflusstechnisch sind die genannten Elemente durch ein automatisiertes Palettentransportsystem verbunden. Das Gesamtsystem ist in Abbildung 59 dargestellt.

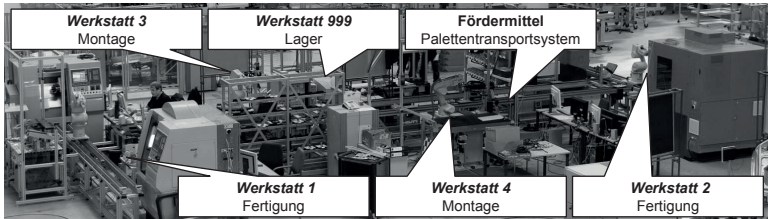


Abbildung 59: Gesamtansicht der produktionstechnischen Versuchsanlage

Die Werkstatt 2 (Fertigung) ist mit den zugehörigen Elementen in Abbildung 60 visualisiert. Sie beinhaltet die beiden Fertigungsmittel EMCO Concept Mill 250 und EMCO Concept Turn 250. Werkstatt 1 (Fertigung) besteht aus artgleichen Elementen, jedoch mit anderen technischen Betriebsmittelfähigkeiten (hier EMCO Concept Mill 155 und EMCO Concept Turn 155).

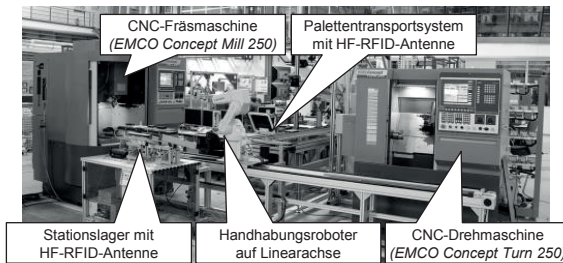


Abbildung 60: Vorderansicht von Werkstatt 2 (Fertigung)

Das Fertigungssystem ist mit einem Sensornetzwerk, bestehend aus sieben HF-RFID-Antennen mit einer Betriebsfrequenz von 13,56 MHz, ausgestattet. Einerseits finden sie Einsatz zur Steuerung des Materialflusses. Andererseits dienen sie zum direkten Informationsaustausch zwischen Produkt und Betriebsmittel und sind in die entsprechende Maschinen- bzw. Anlagensteuerung eingebunden. In Abbildung 61 ist ein Produkt mit integriertem HF-RFID-Transponder mit einer Speichergröße von 8 kByte vor einer HF-RFID-Antenne am Palettentransportsystem dargestellt.

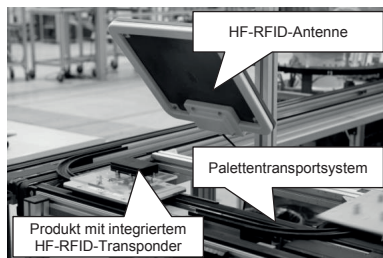


Abbildung 61: Palettentransportsystem mit HF-RFID-Antenne und Produkt mit integriertem HF-RFID-Transponder

7.2.3 Simulationsmodell der produktionstechnischen Versuchsanlage

In Ergänzung zur Umsetzung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung in der produktionstechnischen Versuchsanlage (vgl. Abschnitt 7.2.2) wurde dessen Nutzen wie auch die Leistungsfähigkeit durch den Einsatz eines Simulationsmodells validiert. Zur Herstellung eines Bezuges zur produktionstechnischen Versuchsanlage wurde das Simulationsmodell mit zusätzlichen Werkstätten wie auch darin enthaltenen Fertigungsmitteln, entsprechend denen des Hardware-Demonstrators, modelliert. Auf diese Weise konnten sowohl eine große Anzahl als auch längere Arbeitsvorgangsfolgen betrachtet und somit genügend produktspezifische Auftragsdaten erzeugt sowie die Auswirkungen einer dynamischen Stammdatenbasis untersucht werden.

Das Layout des Simulationsmodells ist in Abbildung 62 dargestellt. Es wurde mit der Software Plant Simulation® (Version 10.1) erstellt und entspricht den Charakteristika einer Werkstattfertigung nach dem VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. (1992, S. 184). Die virtuelle Fertigung ist nach dem Verrich-

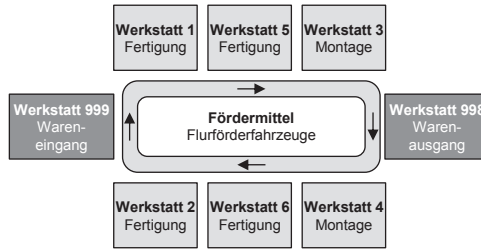


Abbildung 62: Layout der im Simulationsmodell abgebildeten Werkstattfertigungsprinzip organisiert und in 6 Werkstätten (ohne Warenein- und -ausgang) unterteilt. Die einzelnen Werkstätten beinhalten zwischen 2 und 4 Arbeitsplätze bzw. Fertigungsmittel (vgl. Abbildung 63), welche entsprechend der Betriebsmittelfähigkeiten gemäß Herstellerangabe (z. B. *EMCO Concept Mill 155*) und aktueller Konfiguration unter Verwendung des Ressourcenmodells (vgl. Abschnitt 5.2.4) modelliert sind. Zudem sind in allen Werkstätten je ein Organisationsmittel (RFID-Antenne) wie auch zwei Lagermittel (Eingangs- und Ausgangslager) enthalten und verfügen über einen gemeinsamen Ein-/ Ausgang.



Abbildung 63: Exemplarisches Layout einer Werkstatt im Simulationsmodell

Der Materialfluss zwischen den Werkstätten wird durch Flurförderfahrzeuge realisiert und ermöglicht somit einen bedarfsorientierten innerbetrieblichen Transport. Als Produktionssteuerungsverfahren ist die FLT-Regel implementiert. Die Betriebsdatenerfassung erfolgt, wie in Abschnitt 5.3.3.2 beschrieben, über das intelligente Produkt. Nach Abschluss des letzten Arbeitsvorganges und dem Transport in den Warenausgang werden die auf dem Produkt gespeicherten Daten in die Datenbank für produktspezifische Auftragsdaten geschrieben und stehen der Weiterverarbeitung und Analyse zur Verfügung.

Die Erstellung des Simulationsmodells erfolgte unter Berücksichtigung der Vorgehensweise einer Simulationsstudie gemäß VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1.

7.3 Anwendung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

7.3.1 Allgemeines

Innerhalb des vorliegenden Kapitels wird die Anwendung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung beschrieben. Hierbei erfolgt eine Untergliederung in zwei Phasen. Dies ist zum einen die *Modellierungsphase* (vgl. Abschnitt 7.3.2), welche das Einrichten des Systems sowie die damit verbundene Schaffung der erforderlichen Datengrundlage beinhaltet. Zum anderen erfolgen in der *Anwendungsphase* (vgl. Abschnitt 7.3.3) diejenigen Schritte, welche zum Betrieb des Systems notwendig sind. Dies betrifft die kontinuierliche Erfassung der produktspezifischen Auftragsdaten, die darauf aufbauende Bereitstellung der dynamischen Stammdaten wie auch die Ableitung des Produktionswissens sowie die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung.

Die genannten Phasen werden im Folgenden anhand der in Abschnitt 7.2.2 beschriebenen produktionstechnischen Versuchsanlage und des in Abschnitt 7.2.3 dargestellten Simulationsmodells erläutert.

7.3.2 Modellierungsphase

Grundlegende Voraussetzung für die Anwendung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung ist die neutrale Modellierung der Produktionsebene mit den enthaltenen Betriebsmitteln und den den Produktionsaufträgen zugrundeliegenden Arbeitsplänen. Dies erfolgt unter Verwendung der in Abschnitt 5.2 beschriebenen drei Datenmodelle.

Modellierung der Betriebsmittel

Die in der betrachteten Produktion enthaltenen Betriebsmittel sind gemäß des in Abschnitt 5.2.4 beschriebenen Ressourcenmodells hinsichtlich Eigenschaften und Fähigkeiten zu modellieren. Betrachtet werden hierbei Fertigungs-, Förder-, Lager-, Prüf- und Organisationsmittel (vgl. Tabelle 5). Die hierzu erforderlichen Daten stammen u. a. aus den technischen Herstellerangaben der Betriebsmittel sowie aus dem Einsatzzweck und der aktuellen Konfiguration. In Abbildung 64 ist am Beispiel des Fertigungsmittels 102 (*EMCO Concept Mill 155*) von Werkstatt 1 (Fertigung) dies exemplarisch als UML-Objektdiagramm dargestellt. Das Ergebnis dieses Modellierungsschrittes ist eine Bibliothek aller in der Produkti-

onsebene befindlichen Betriebsmittel, welche mit Hilfe des Ressourcenmodells modelliert sind.

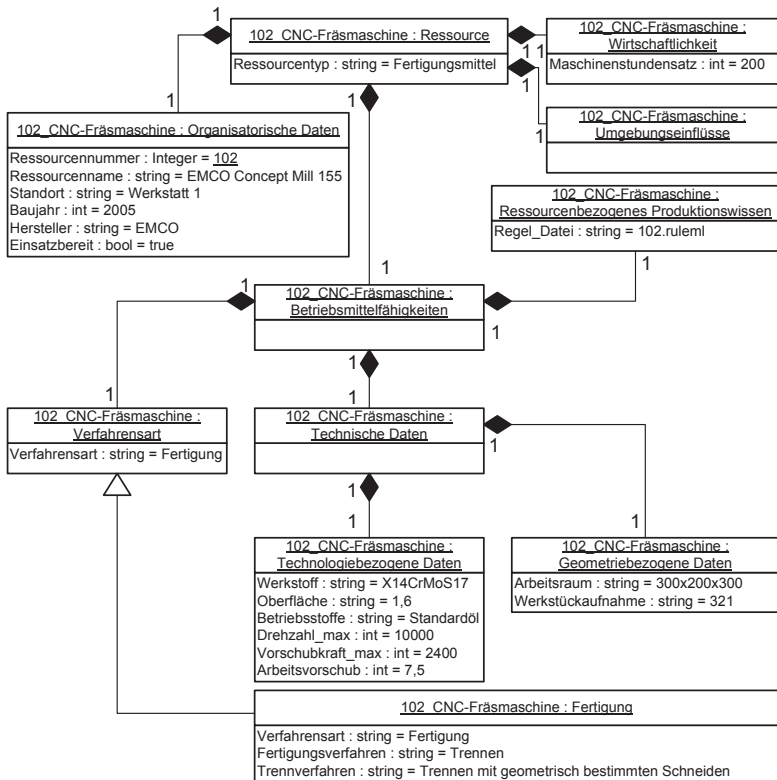


Abbildung 64: Fertigungsmittel 102 (EMCO Concept Mill 155) in Werkstatt 1 als UML-Objektdiagramm

Modellierung der Produktionsebene

Zur Beschreibung der Produktionsebene werden die erstellten Modelle der Betriebsmittel den jeweiligen Werkstätten zugeordnet. Hierbei wird das in Abschnitt 5.2.5 beschriebene Produktionsmodell verwendet. Zur Realisierung der Offline-Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten ist es essentiell, dass jeder Werkstattdirektor mit mindestens einem Organisationsmittel (hier HF-RFID-Antenne) ausgestattet ist und so die erforderlichen Zeitstempel gesetzt werden können. Für die produktionstechnische Versuchsanlage ist dies exemplar-

risch in Abbildung 65 dargestellt. Für Werkstatt 1 (Fertigung) sind zudem die enthaltenen Betriebsmittel dargestellt, welche bei den restlichen Werkstätten nicht explizit visualisiert sind.

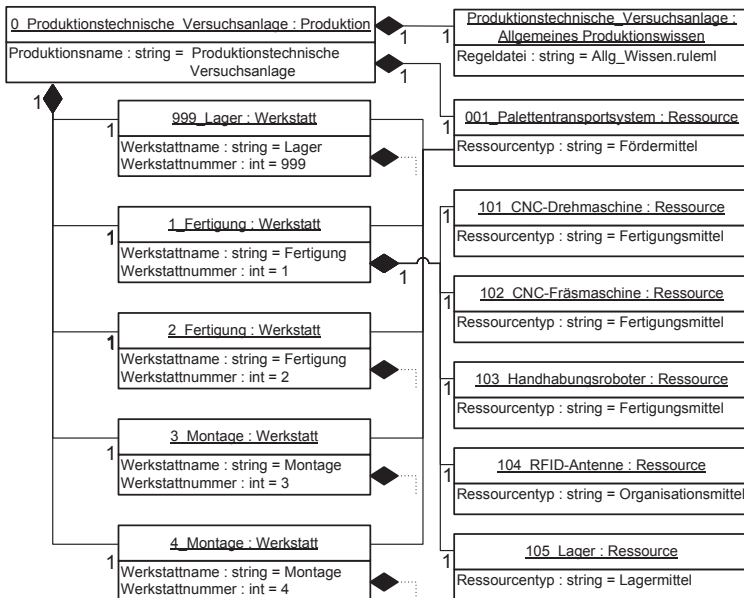


Abbildung 65: Produktionstechnische Versuchsanlage als UML-Objektdiagramm

Das Ergebnis dieses Modellierungsschrittes ist die Zuordnung aller Betriebsmittel zu den Werkstätten bzw. übergeordneten Bereichen.

Modellierung der Produktionsaufträge

Zur Modellierung der Produktionsaufträge ist es zunächst erforderlich, auftragsneutrale Arbeitspläne zu erstellen. Die darin enthaltenen Arbeitsvorgänge werden auf Basis des in Abschnitt 5.2.3 vorgestellten Auftragsmodells initial für Rüst- und Bearbeitungsvorgänge durchgeführt. Beispielhaft ist in Abbildung 66 ein durch einen Kundenauftrag instanziiertes Produktionsauftrag dargestellt. Darin sind bisher nur die Werte der Plan-Parameter enthalten und werden entsprechend des Produktionsfortschrittes mit weiteren Attribut-Werten ergänzt. Dies betrifft alle Ist-Werte, wie Durchführungsdauer, Beginn- und Endzeitpunkt wie auch das ausführende Betriebsmittel der einzelnen DLZ-Anteile sowie dessen spezifischen Produktionszustand zum Zeitpunkt der Durchführung.

7.3 Anwendung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

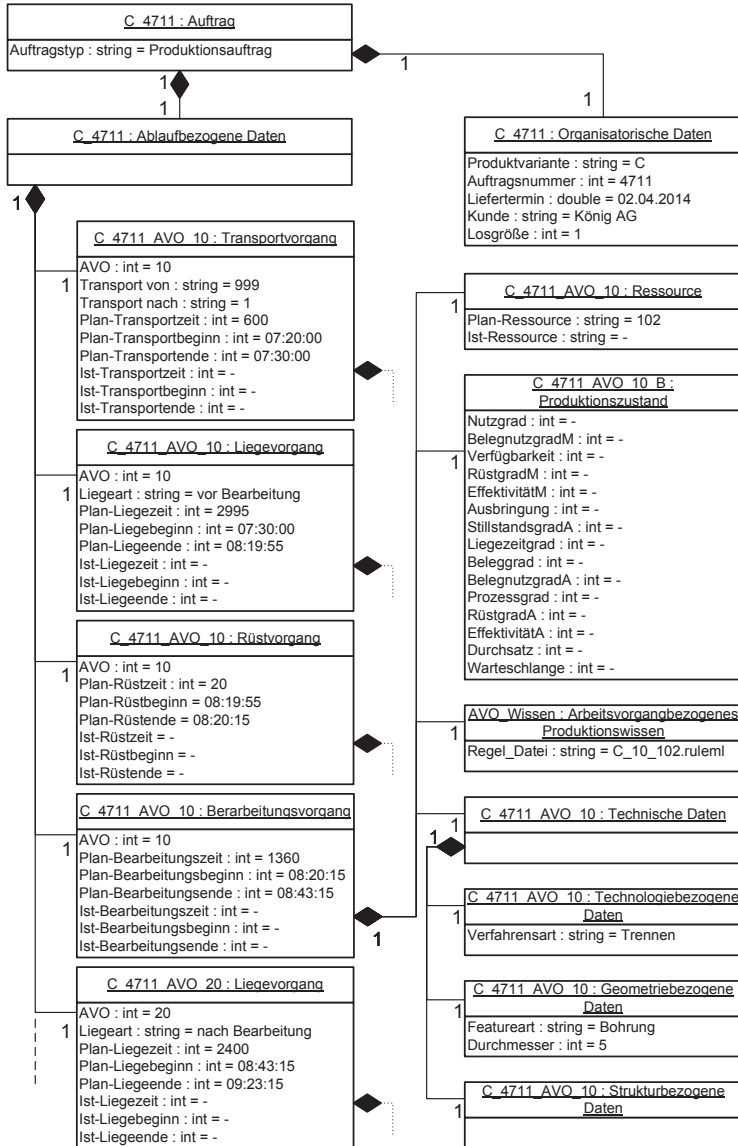


Abbildung 66: Ausschnitt eines instanziierten Produktionsauftrages als UML-Objektdiagramm vor der Auftragsfreigabe

7.3.3 Anwendungsphase

7.3.3.1 Allgemeines

Die Grundlage für die Anwendung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung stellen die in der Modellierungsphase generierten Datenmodelle dar. Diese können, sofern erforderlich, z. B. bei Veränderung der Konfiguration oder dem Ausfall eines Betriebsmittels, zu jeder Zeit adaptiert und so dem System in der Anwendungsphase zur Verfügung gestellt werden.

In der Anwendungsphase erfolgt eine kontinuierliche Aufnahme und Verarbeitung der produktspezifischen Auftragsdaten. Daher ist es erforderlich, jeweils im Vorfeld der Maschinenbelegungsplanung die Bereitstellung der dynamischen Stammdaten wie auch die Ableitung des Produktionswissens durchzuführen.

7.3.3.2 Offline-Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten

Die Offline-Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten wurde in der produktionstechnischen Versuchsanlage prototypisch implementiert. Zu diesem Zweck wurden RFID-Antennen sowohl im Transportsystem als auch in den einzelnen Werkstätten installiert sowie in die Maschinen- bzw. Anlagensteuerung integriert (vgl. Abschnitt 7.2.2). Die Aufnahme der Betriebsdaten erfolgt entsprechend des in Abschnitt 5.3.3.2 beschriebenen Vorgehens durch das Setzen von Zeitstempeln auf das mit einem RFID-Transponder ausgestattete Produkt im XML-Format (eXtensible Markup Language). In Abbildung 67 ist der Inhalt ei-

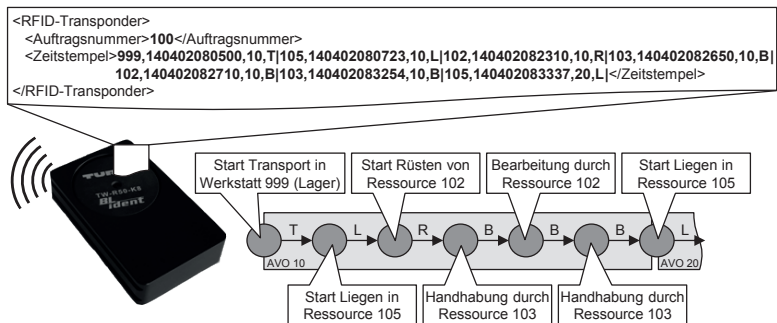


Abbildung 67: Daten auf intelligentem Produkt in XML-Notation des Auftrages mit der Nummer 100 zum betrachteten Zeitpunkt

nes Transponders zu einem bestimmten Zeitpunkt dargestellt. Demnach befindet sich das Produkt im DLZ-Anteil *Liegen nach Bearbeitung* im Lager (Ressource 105) von Werkstatt 1.

Mit Hilfe der entwickelten Applikation zur Auswertung der Zeitstempel lassen sich die damit aufgenommenen Zeitintervalle extrahieren und visualisieren (vgl. Abbildung 68). Es können damit RFID-Transponder ausgelesen, die Transponderdaten in die Datenbank übertragen und bereits in der Datenbank enthaltene abgeschlossene Aufträge analysiert werden.

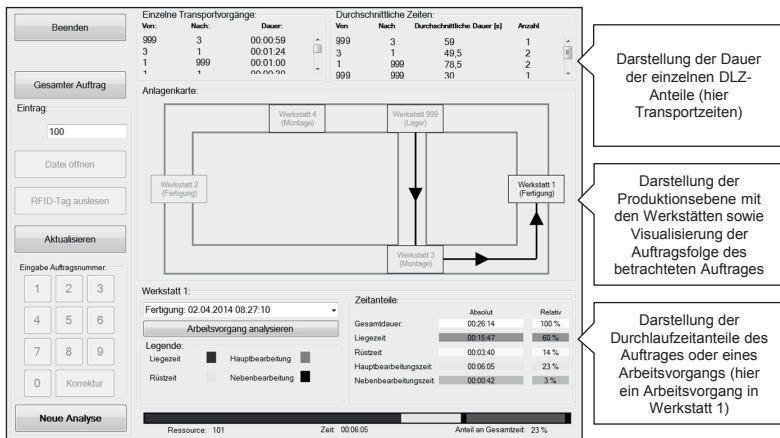


Abbildung 68: Benutzeroberfläche der Applikation zur Auswertung der Zeitstempel im Rahmen der Offline-Betriebsdatenerfassung

Nach Fertigstellung des Produktionsauftrages werden die Transponder-Daten ausgelesen und in strukturierter Form in einer Datenbank abgespeichert und auf diese Weise mit dessen zugehörigem Auftragsmodell verknüpft. Dieses Vorgehen wird für alle abgeschlossenen Produktionsaufträge äquivalent durchgeführt. Auf Basis der so entstandenen Datengrundlage erfolgt die Bewertung des Produktionszustandes mit Hilfe des hierzu entwickelten Kennzahlensystems (vgl. Abschnitt 5.3.3.3).

Aufgrund der bereits beschriebenen Notwendigkeit einer hohen Anzahl an produktspezifischen Auftragsdaten, werden in der weiteren Darstellung der Anwendung des entwickelten Systems die durch die Simulation generierten Daten verwendet.

Zur Bewertung des Produktionszustandes wird der zu betrachtende Zeitraum, d. h. die Bezugsgrundlage, festgelegt und die Berechnung entsprechend durchgeführt. Das Ergebnis dieses Schrittes ist beispielhaft für alle Bearbeitungszeiten von AVO 20 des Produktmodells C am Fertigungsmittel 102 (*EMCO Concept Mill 155*) von Werkstatt 1 (Fertigung) im betrachteten Zeitraum in Abbildung 69 visualisiert. Zudem ist ein spezifischer Arbeitsvorgang an diesem Fertigungsmittel, hier Auftrag 563, mit dessen zum Zeitpunkt der Durchführung vorliegendem Produktionszustand dargestellt.

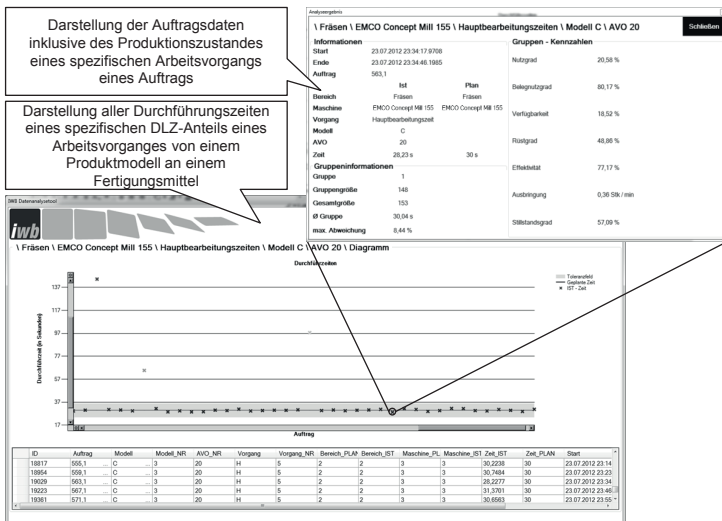


Abbildung 69: Benutzeroberfläche der Applikation zur Analyse der produktspezifischen Auftragsdaten

Für jeden DLZ-Anteil innerhalb des betrachteten Zeitintervalls werden somit produktspezifische Auftragsdaten, welche den spezifischen Produktionszustand enthalten, auf Basis der mit dem Produkt aufgenommenen Zeitstempel erzeugt. Diese stellen für die Generierung der dynamischen Stammdaten als auch die Ableitung des Produktionswissens die erforderliche Grundlage dar.

7.3.3.3 Generierung der dynamischen Stammdaten

Zur Realisierung einer aktuellen Stammdatenbasis ist es erforderlich, diesen Schritt im Vorfeld der Maschinenbelegungsplanung durchzuführen, um die neu-

7.3 Anwendung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung

ersten Ist-Daten der DLZ-Anteil-Arten *Bearbeiten*, *Rüsten* und *Transportieren* bei der Erstellung der dynamischen Stammdaten zu berücksichtigen. Die Beschreibung der Zeitparameter der einzelnen DLZ-Anteile der Arbeitsvorgänge als Verteilungsfunktionen erfolgt auf Basis des in Abschnitt 5.4.2.2 beschriebenen Vorgehens. In Abbildung 70 ist die Benutzeroberfläche der hierzu entwickelten Applikation visualisiert. Darin sind am Beispiel des Rüstvorganges der AVO 10 der Produktvariante A die diesen DLZ-Anteil beschreibenden Parameter dargestellt, welche auf den letzten 138 gemessenen Durchführungszeiten basieren. Nachdem die aktualisierten Zeitwerte den dynamischen Stammdaten hinzugefügt wurden, können sie zur Maschinenbelegungsplanung eingesetzt werden.

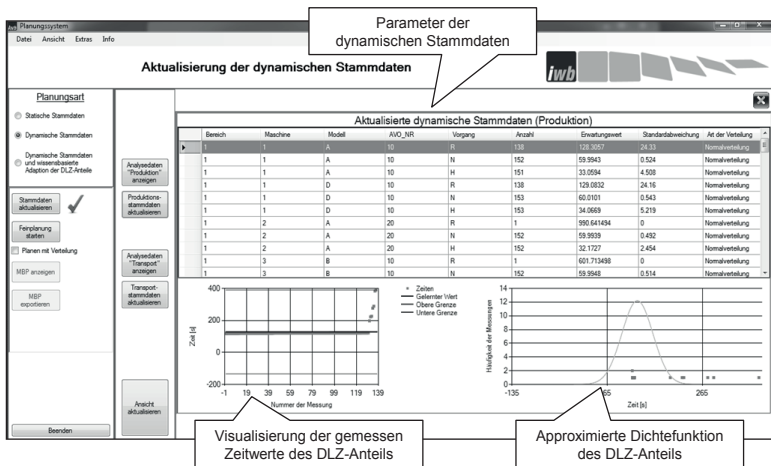


Abbildung 70: Benutzeroberfläche der Applikation zur Aktualisierung der dynamischen Stammdaten

In Abbildung 71 ist ein Auszug aus der entsprechenden Datenbank dargestellt, die nun anstelle von expliziten Zeitwerten die Parameter der Verteilungsfunktion, d. h. für die Normalverteilung den Erwartungswert μ und die Standardabweichung σ , beinhalten.

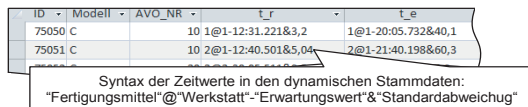


Abbildung 71: Auszug aus den dynamischen Stammdaten

7.3.3.4 Generierung des Produktionswissens

Das Produktionswissen wird, wie in Abschnitt 5.4.2.3 beschrieben, in fall- und regelbasierter Form repräsentiert und somit der Maschinenbelegungsplanung zur Verfügung gestellt. Unterteilt wird es in vier unterschiedliche Wissensarten. Diese sind das DLZ-Anteil-bezogene, das ressourcenbezogene, das auftragsfolgebezogene wie auch das allgemeine Produktionswissen (vgl. Abschnitt 5.4.2.3).

Im Folgenden wird für jede Repräsentationsart exemplarisch jeweils eine Umsetzung, wie sie im System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung erfolgt ist, dargestellt.

Fallbasierte Repräsentation des Produktionswissens

Die fallbasierte Repräsentation findet Verwendung zur Beschreibung des DLZ-Anteil-bezogenen Produktionswissens. Dieses bezieht sich auf einen spezifischen DLZ-Anteil und den Produktionszustand, welcher zum Zeitpunkt der Durchführung vorgelegen hat. Durch die Art der Datenaufnahme und -verarbeitung im Rahmen der Offline-Betriebsdatenerfassung stellt ein um den Produktionszustand erweiterter Datensatz bereits einen Fall dar, der in die Fallbasis des WBS überführt wird. In der vorliegenden Anwendung ist ein Fall f durch 16 produktionszustandsbeschreibende Attribute repräsentiert. In Abbildung 72 ist dies am Beispiel des DLZ-Anteils Bearbeiten von AVO 20 des Produktmodells C an Fertigungsmittel 102 (*EMCO Concept Mill 155*) von Werkstatt 1 (Fertigung) des Auftrages 563 dargestellt. Nicht visualisiert sind die unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren der Attribute, welche in der Fallbasis vorgehalten sind und im Rahmen des fallbasierten Schließens zudem verwendet werden können.

identifizierende Attribute				lösungsbeschreibendes Attribut				produktionszustandsbeschreibende Attribute			
Auftragsnummer	Startzeit	Werkstatt	Fertigungsmittel	Produkt	AVO	Bearbeitungszeit	Nutzgrad	Verfügbarkeit	RestgradM	Durchsatz	
563	23.07.2012 23:34:17.9708	1	2	C	20	28,23	0,20582	0,18524	0,48858	4,99	
221	22.10.2012 07:25:29.1543	3	4	A	70	102,45	0,4137	0,30822	0,1408	10,75	

Abbildung 72: Ausschnitt aus der Fallbasis des WBS für Bearbeitungsvorgänge

Somit stellt jeder durch das intelligente Produkt aufgenommene und hinsichtlich des vorliegenden Produktionszustandes erweiterte spezifische DLZ-Anteil einen Fall dar, welcher im wissensbasierten System zur Adaption der DLZ-Anteil-Dauer verwendet wird.

Regelbasierte Repräsentation des Produktionswissens

Die regelbasierte Repräsentation wird sowohl für die Bereitstellung des ressourcen- und auftragsfolgebezogenen Produktionswissens, welches durch Induktion erzeugt wird, als auch für das allgemeine Produktionswissen, welches explizit vorgegeben wird, verwendet. Für die Datenverarbeitung und Ableitung des regelbasierten Wissens wird in der prototypischen Umsetzung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung die Software *RapidMiner Studio*® Version 6 verwendet. Die Speicherung und Verfügbarmachung des regelbasierten Wissens erfolgt in der Auszeichnungssprache RuleML (Rule Markup Language) (vgl. www.ruleml.org). Dabei handelt es sich um eine XML-basierte Sprache, welche zur Beschreibung von Transformationen auf Daten eingesetzt wird.

Folgend wird anhand der DLZ-Anteil-Art *Bearbeiten* des Fertigungsmittels 102 (*EMCO Concept Mill 155*) von Werkstatt 1 (Fertigung) exemplarisch die Umsetzung der Ableitung des ressourcenbezogenen Produktionswissens beschrieben. Dieses entspricht dem in Abschnitt 5.4.2.3 dargestellten Vorgehen. Basierend auf den produktspezifischen Auftragsdaten werden für die betrachtete DLZ-Anteil-Art die Abweichungsverhältnisse τ mit Hilfe von Formel (34) gebildet. Im vorliegenden Fall wurden hierzu die letzten 50 Bearbeitungsvorgänge auf diesem Fertigungsmittel herangezogen. Die darauffolgende Segmentierung in Abweichungscluster hat die Zusammenstellung von Partitionen ähnlicher Abweichungsverhältnisse zum Ziel. In Abbildung 73 ist das Ergebnis der Segmentierung des hier betrachteten Datensatzes mit 50 Elementen für den Wert des

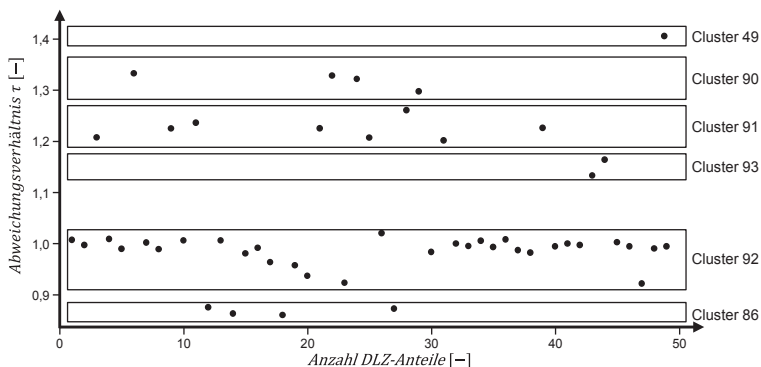


Abbildung 73: Diagramm Abweichungsverhältnis τ von DLZ-Anteil-Art *Bearbeiten* des Fertigungsmittels 102 (*EMCO Concept Mill 155*) von Werkstatt 1 (Fertigung) und Zuordnung von Abweichungsclustern

Abweichungsverhältnisses τ der DLZ-Anteil-Art *Bearbeiten* dargestellt. Dabei wird bei der Zusammenführung von Cluster 91 und 93 zu Cluster 94 die zuvor definierte maximale Abweichungskusterbreite $k_{max} = 0,1$ erreicht (vgl. Abbildung 74). Zu diesem Zeitpunkt liegen sechs Cluster vor, die im Weiteren die Abweichungskuster darstellen.

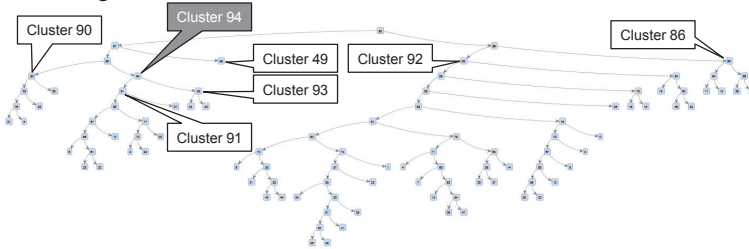


Abbildung 74: Baumstruktur der hierarchischen Clusteranalyse bei Erreichen des Abbruchkriteriums bei Bildung von Cluster 94 (Zusammenführung von Cluster 91 und 93)

Im Rahmen der anschließenden Klassifikation wird der um die Abweichungskusterzuordnung ergänzte Datensatz hinsichtlich des Einflusses der einzelnen produktionszustandsbeschreibenden Attribute auf das Zielattribut, hier das Abweichungsverhältnis τ der betrachteten DLZ-Anteil-Art, und damit auf die Zuordnung der Abweichungskuster untersucht. Für die hier betrachtete DLZ-Anteil-Art *Bearbeiten* des Fertigungsmittels 102 (*EMCO Concept Mill 155*) von Werkstatt 1 (Fertigung) ist ein möglicher resultierender Binärbaum mit den zugehörigen hierarchischen Klassifikatoren (hier die produktionszustandsbeschreibenden Attribute) in Abbildung 75 dargestellt. Zudem ist ein Ausschnitt des damit repräsentierten ressourcenbezogenen Produktionswissens in der XML-basierten Sprache *RuleML* (Version 0.9) visualisiert. In dieser Form kann es vom wissensbasierten System zur Adaption von DLZ-Anteilen eingelesen und auf den zu überprüfenden Datensatz angewendet werden. Dementsprechend werden für alle Fertigungsmittel Regel-Dateien der DLZ-Anteil-Arten *Bearbeiten* und *Rüsten* sowie für Fördermittel die DLZ-Anteil-Art *Transportieren* in der Auszeichnungssprache *RuleML* erzeugt und in der Regelbasis des WBS gespeichert.

Das Vorgehen zur Erzeugung des auftragsfolgebezogenen Produktionswissens ist, mit Ausnahme der Datentransformation, äquivalent zum Vorgehen beim ressourcenbezogenen Produktionswissen und wird ebenfalls für alle Fertigungs- und

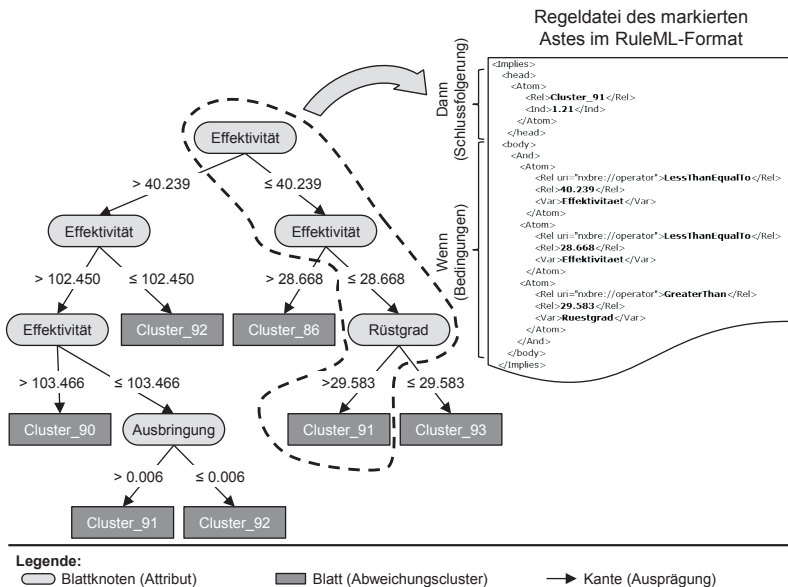


Abbildung 75: Binärbaum des ressourcenbezogenen Produktionswissens am Beispiel der DLZ-Anteil-Art Bearbeiten des Fertigungsmittels 102 (EMCO Concept Mill 155) von Werkstatt 1 (Fertigung)

Fördermittel durchgeführt. Allgemeines Produktionswissen wird direkt durch die Erzeugung einer entsprechenden RuleML-Datei der Regelbasis übergeben.

7.3.3.5 Wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung

Die zugrundeliegende funktionsorientiert gestaltete Softwarearchitektur des Planungssystems ist schematisch in Abbildung 76 dargestellt. Eine Hauptroutine (MAIN) ermöglicht das Zusammenspiel der einzelnen Unterprogramme. Diese entsprechen den in Abschnitt 6.4 beschriebenen Algorithmen der Funktionen der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung. Die erforderlichen Schnittstellen zu Datenbanken wie auch anderen Systemen sind über ein entsprechendes Interface realisiert. Die Eingangsdaten für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung stellt die vom ERP übergebene Auftragsliste dar. Der Maschinenbelegungsplan, welcher dann entweder in der produktionstechnischen Versuchsanlage oder dem Simulationsmodell umgesetzt wird, stellt dahingegen

die Ausgangsdaten dar. Die Steuerung des Planungssystems erfolgt über eine zentrale GUI (Graphical User Interface), welche die Kommunikation zum Benutzer ermöglicht.

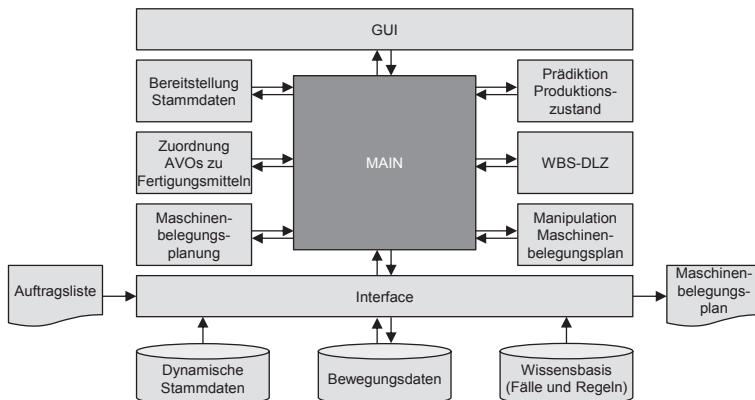


Abbildung 76: Schematische Darstellung der Architektur des Software-Prototypen des Planungssystems

Die Beschreibung der Funktionsweise der einzelnen Unterprogramme des Planungssystems wird im Folgenden beispielhaft anhand 10 einzuplanender Produktionsaufträge, welche insgesamt vier unterschiedliche Produktvarianten beinhalten, dargestellt. Jeder Produktionsauftrag besteht aus sieben AVOs und ist, wie in Abschnitt 7.3.2 beschrieben, durch Verwendung des Auftragsmodells modelliert. Als Produktionsebene dient das in Abschnitt 7.2.3 beschriebene Simulationsmodell der erweiterten produktionstechnischen Versuchsanlage.

Schritt 1: Zuordnung AVOs zu Fertigungsmitteln

Im Rahmen eines Planungsvorgangs findet dieser Schritt einmalig zu dessen Beginn statt. Dabei werden auf Basis der produktseitigen geometrischen und technologischen Anforderungen der Arbeitsvorgänge diejenigen Fertigungsmittel identifiziert, welche die erforderlichen Fähigkeiten zur Durchführung besitzen sowie im betrachteten Planungshorizont verfügbar sind (vgl. Abschnitt 6.4.2). In Abbildung 77 ist das Ergebnis der Zuordnung für die Produktvariante C dargestellt. Dort ist z. B. ersichtlich, dass AVO 40 auf vier unterschiedlichen Fertigungsmitteln mit jeweils spezifischen Durchführungszeiten herstellbar ist.

Bereitstellung der DLZ-Anteile der Arbeitsvorgänge als Verteilungsfunktionen

Geometrische und technologische Anforderungen der einzelnen AVOs (hier Bauraum)

ID	Modell	AVO_NR	t _r	t _e	X_Dim	Y_Dim	Z_Dim
75050 C		10	1@1-12:31.221&3,2	1@1-20:05.732&40,1	400	250	250
75051 C		10	2@1-12:40.501&5,04	2@1-21:40.198&60,3	350	250	250
75052 C		20	2@2-30:05.511&9,5	2@2-5:22.952&14,3	350	250	250
75053 C		20	3@2-27:55.558&12,8	3@2-5:10.256&22,0	350	250	250
75054 C		30	1@3-45:41.005&151	1@3-8:33.005&22,8	350	250	250
75055 C		40	1@4-09:01.361&2,5	1@4-0:01.507&1,9	200	250	250
75056 C		40	2@4-12:27.267&1,7	2@4-4:13.000&1,5	200	250	250
75057 C		40	3@4-10:10.110&1,5	3@4-3:59.620&1,0	200	250	250
75058 C		40	4@4-7:40.030&1,9	4@4-22:23.977&165,3	200	250	250
75059 C		50	2@5-18:43.678&221				

AVO 40 kann auf vier unterschiedlichen Fertigungsmitteln in Werkstatt 4 hergestellt werden

Abbildung 77: Ausschnitt aus der Zuordnung der AVOs von Produktvariante C zu den Fertigungsmitteln im betrachteten Planungshorizont

Im vorliegenden Fall können die AVOs aller 10 Aufträge durch den vorhandenen Maschinenpark hergestellt werden. Die in diesem Schritt erzeugte Zuordnung wird im darauffolgenden Schritt der Maschinenbelegungsplanung zur Terminierung der Produktionsaufträge verwendet.

Schritt 2: Maschinenbelegungsplanung

Die Terminierung der einzelnen Arbeitsvorgänge auf die zur Verfügung stehenden Fertigungsmittel erfolgt im Schritt der Maschinenbelegungsplanung. Auf Basis des in Abschnitt 6.4.2 beschriebenen Algorithmus (hier mit FLT-Regel) wird ein aktiver Belegungsplan erzeugt, welcher alle DLZ-Anteil-Arten berücksichtigt. In Abbildung 78 ist dies für die betrachteten 10 Produktionsaufträge auf der linken Seite aus Fertigungsmittel- und auf der rechten Seite aus Auftragsicht (hier Auftrag 4) dargestellt. Zur Maschinenbelegungsplanung bietet das Planungssystem die Möglichkeit, unterschiedliche Planungsarten zu verwenden. Zum einen kann eine *statische Stammdatenbasis*, welche die ursprünglichen, von der Arbeitsplanung vorgegebenen Zeitwerte für die DLZ-Anteile beinhaltet, genutzt werden. Damit ist es möglich, einen Initial-Belegungsplan zu erzeugen, welcher im Rahmen der Bewertung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung eingesetzt wird (vgl. Abschnitt 7.5). Zum anderen kann mit einer *dynamischen Stammdatenbasis* die Belegungsplanung durchgeführt werden. Hierbei werden die durch Verteilungsfunktionen beschriebenen Zeitwerte der DLZ-Anteile verwendet. Die Bereitstellung der Daten im Rahmen der prototypischen Umsetzung ist in Abschnitt 7.3.3.3 beschrieben. Des Weiteren kann,

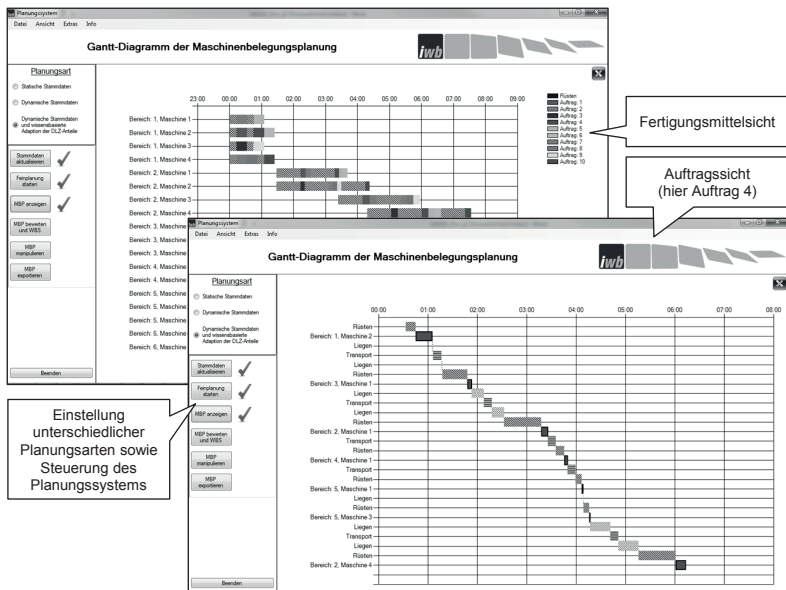


Abbildung 78: Benutzeroberfläche der Applikation zur Maschinenbelegungsplanung (hier Fertigungsmittel- und Auftrags-sicht)

wie in Abbildung 78 visualisiert, der auf den dynamischen Stammdaten basierende Maschinenbelegungsplan zusätzlich noch mit Hilfe des wissensbasierten Systems adaptiert werden. Dies wird in den folgenden Schritten beschrieben. Für die beiden erstgenannten Planungsarten ist der Prozess der Maschinenbelegungsplanung zu diesem Zeitpunkt bereits abgeschlossen.

Schritt 3: Prädiktion Produktionszustand

Bevor einzelne DLZ-Anteile durch das WBS überprüft und gegebenenfalls im Maschinenbelegungsplan angepasst werden können, ist es erforderlich, die zum Zeitpunkt ihrer Durchführung zu erwartenden Produktionszustände zu bestimmen. Die Grundlage für die Bewertung stellen die im Maschinenbelegungsplan enthaltenen DLZ-Anteile dar (Datenbank *Planungsdaten*). Die Berechnung der produktionszustandsbeschreibenden Kennzahlen erfolgt mit dem in Abschnitt 5.3.3.3 beschriebenen Kennzahlensystem und läuft entsprechend des in Abschnitt 6.4.3 erläuterten Algorithmus ab. Dabei werden sowohl auftrags- als auch betriebsmittelbezogene Kennzahlen berechnet und den DLZ-Anteilen als produktionszustandsbeschreibende Attribute zugeordnet. In Abbildung 79 ist die Benut-

zeroberfläche der im Software-Prototypen umgesetzten Applikation zur Prädiktion von Produktionszuständen dargestellt. Neben der Darstellung der Planungsdaten und der generierten Kennzahlen werden zudem die Unsicherheiten der einzelnen DLZ-Anteile visualisiert. Dies ermöglicht ein Erkennen von möglichen kritischen DLZ-Anteil-Reihenfolgen und lässt so noch eine Anpassung des Sicherheitsaufschlags Δt_s zu. Im vorliegenden Fall wird als Sicherheitsaufschlag Δt_s die Standardabweichung σ verwendet.

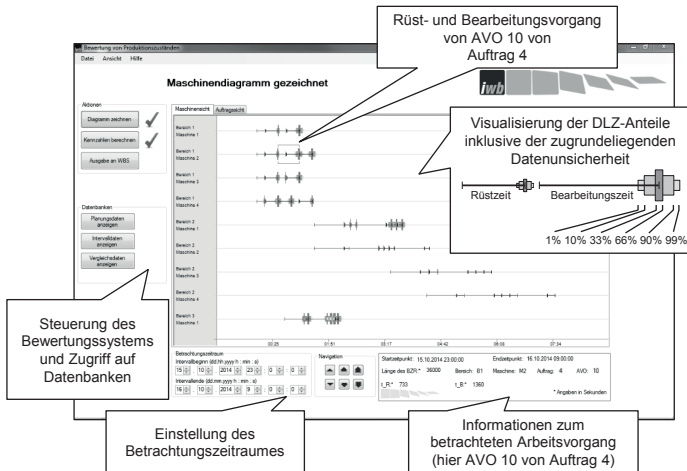


Abbildung 79: Benutzeroberfläche der Applikation zur Prädiktion des Produktionszustandes

Nach Abschluss der Kennzahlenberechnung und gegebenenfalls der Belegungsplananpassung wird der um den Produktionszustand je DLZ-Anteil ergänzte Datensatz (Datenbank *Vergleichsdaten*) dem WBS übergeben. Dieser beinhaltet die im Betrachtungszeitraum enthaltenen DLZ-Anteile, welche ein sog. Planungsszenario bilden.

Schritt 4: Wissensbasierte Adaption von DLZ-Anteilen

Die wissensbasierte Adaption von DLZ-Anteilen erfolgt in einer eigenständigen Applikation, deren Benutzeroberfläche in Abbildung 80 dargestellt ist. Zu Beginn ist es erforderlich, das im vorherigen Schritt erstellte Planungsszenario und die darin enthaltenen zu überprüfenden Planungsfälle in das WBS zu übernehmen. Im vorliegenden Fall wird nur ein Planungsfall (ID: 989), der Bearbeitungsvorgang der AVO 10 von Auftrag 4 an Fertigungsmittel 2 von Werkstatt 1,

übernommen. Des Weiteren ist es notwendig, die für den Prozess des fallbasierten Schließens zugrundeliegende Fallbasis wie auch die für den Prozess des regelbasierten Schließens benötigte Regelbasis (vgl. Abschnitt 7.3.3.4) dem WBS verfügbar zu machen. Dies erfolgt jeweils durch Angabe des entsprechenden Dateipfades. Für die Regelbasis ist das ressourcenbezogene Produktionswissen von Fertigungsmittel 2 in Werkstatt 1 (hier Datei 102.ruleml) ausgewählt.

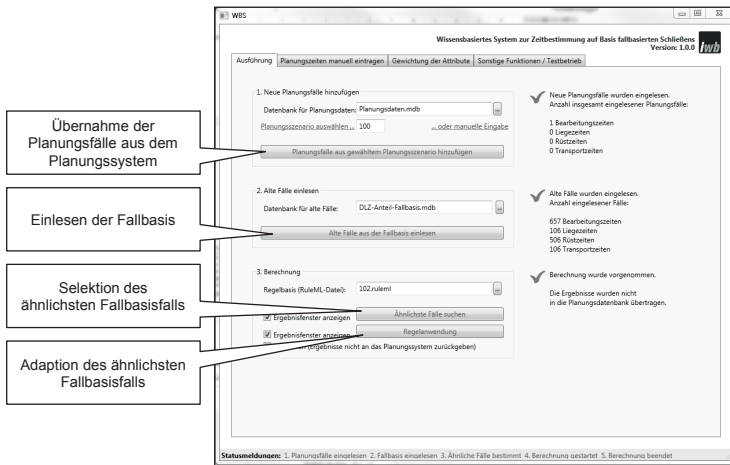


Abbildung 80: Benutzeroberfläche der Applikation zur wissensbasierten Adaption von DLZ-Anteilen

Die Berechnung der resultierenden Adaption der DLZ-Anteile erfolgt gemäß des in Abschnitt 6.4.4 beschriebenen Vorgehens. In Abbildung 81 ist das Ergebnis der Ähnlichkeitsbestimmung für den betrachteten Planungsfall dargestellt. Diese

alter Fall ID	Auftragsnummer	Dauerlzt	Max Nutzgrad	Nutzgrad (Fallbasis)	Nutzgrad (Fallbasis) Norm	Nutzgrad (Planungsfall)	Nutzgrad	Gesamter Ähnlichkeitsgrad
Planungsfall ID: 989 (für: Bereich=1 / Maschine=2 / Produkt=C / AVO=10)								
452	102	1720	1	0,8	0,8	0,41		69,35 %
453	336	1522	1	0,76	0,76	0,41		72,44 %
454	28	1552	1	0,71	0,71	0,41		73,40 %
455	87	2010	1	0,69	0,69	0,41		69,45 %
456	202	1150	1	0,58	0,58	0,41		62,23 %
457	298	2302	1	0,13	0,13	0,41		60,00 %
458	32	2123	1	0,54	0,54	0,41		74,56 %
459	94	1422	1	0,75	0,75	0,41		64,26 %
460	23	1569	1	0,05	0,05	0,41		72,91 %
461	76	1987	1	0,62	0,62	0,41		58,99 %
462	52	1665	1	0,45	0,45	0,41		66,85 %
463	366	2253	1	0,44	0,44	0,41		65,40 %
464	702	1666	1	0,17	0,17	0,41		66,43 %
465	39	2012	1	0,54	0,54	0,41		64,55 %

Abbildung 81: Ausgabe der Ähnlichkeitsbestimmung in Bezug auf den betrachteten Planungsfall (hier ID: 989)

erfolgt durch eine vorwärtsverkettete Inferenz. Auf einem Vergleich der jeweiligen (bei Bedarf gewichteten) produktionszustandsbeschreibenden Attribute basierend, wird der gesamte Ähnlichkeitsgrad ($DLZ\text{-Anteil}\text{-Ähnlichkeit}$ $\text{sim}_{DLZ\text{-Anteil}}$) bestimmt. Dabei weist der DLZ-Anteil-Fall 456 mit einem gesamten Ähnlichkeitsgrad von 93,23 % die größte Übereinstimmung auf.

Zur anschließenden regelbasierten Adaption des identifizierten ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls wird im Software-Prototypen die Inferenzmaschine *NxBRE* (Version 3.2.0) verwendet. Am vorliegenden Beispiel führt die Regelanwendung (hier das ressourcenbezogene Produktionswissen von Fertigungsmittel 2 in Werkstatt 1) zu dem in Abbildung 82 dargestellten Ergebnis. Somit ist die Durchführungsdauer des ähnlichsten DLZ-Anteil-Falls um den Faktor 1,21 zu multiplizieren. Die sich ergebende adaptierte Durchführungsdauer von 2002 Sekunden wird als neuer Planwert dem Planungssystem übergeben.

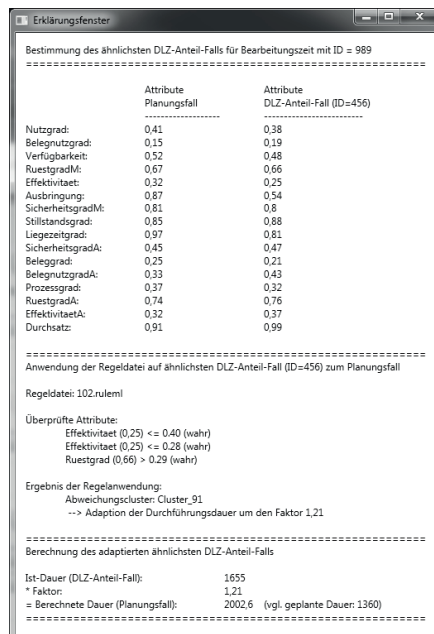


Abbildung 82: Ausgabe der Erklärung nach Anwendung des ressourcenbezogenen Produktionswissens von Fertigungsmittel 2 in Werkstatt 1

Die Anwendung der anderen Arten des Produktionswissens erfolgt in äquivalen-ter Form und wird daher nicht explizit dargestellt.

Schritt 5: Manipulation Maschinenbelegungsplan

Entsprechend des übergebenen adaptierten Planwertes erfolgt die Adaption des Maschinenbelegungsplans. In Abbildung 83 ist dies für den Bearbeitungsvorgang von AVO 10 des Auftrags 4 an Fertigungsmittel 2 in Werkstatt 1 dargestellt, welcher von einer ursprünglichen Durchführungszeit von 1360 Sekunden auf

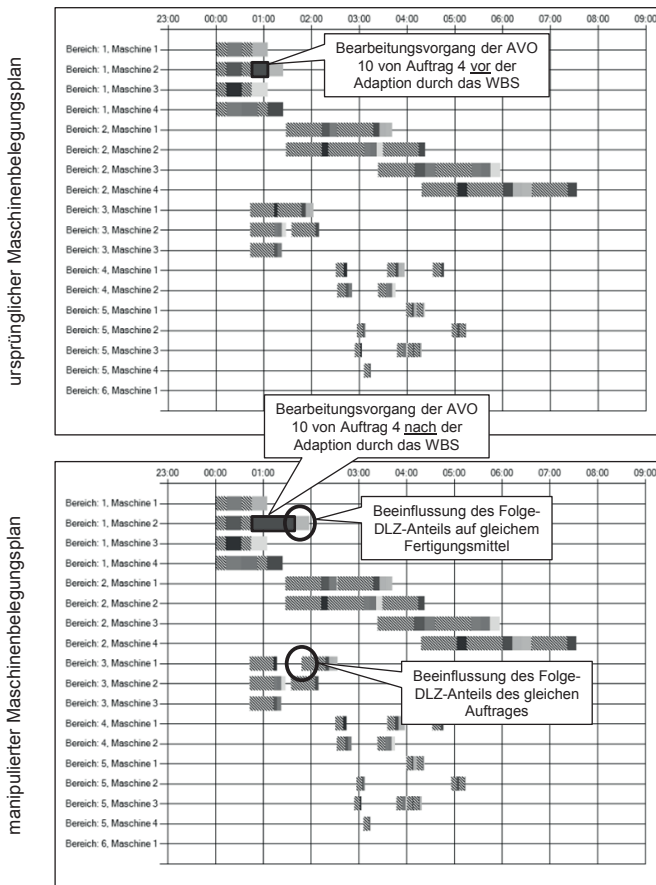


Abbildung 83: Manipulation des Maschinenbelegungsplanes durch Adaption des betrachteten DLZ-Anteils

eine durch das wissensbasierte System adaptierte Durchführungszeit von 2002 Sekunden angepasst wurde. Zudem ist dort dargestellt, dass durch die Adaption des betrachteten DLZ-Anteils sowohl der Folge-DLZ-Anteil des gleichen Auftrags sowie der DLZ-Anteil des Folgeauftrages auf dem ausführenden Fertigungsmittel betroffen ist. In diesem Fall wird für die bisher nicht überprüften DLZ-Anteile erneut eine Belegungsplanung durchgeführt. Für den Fall, dass kein anderer DLZ-Anteil davon betroffen ist, erfolgt die Adaption des nächsten noch nicht überprüften DLZ-Anteils im Planungshorizont. Sind alle DLZ-Anteile adaptiert, ist die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung abgeschlossen. Das Ergebnis stellt einen an die zu erwartenden Bedingungen in der Produktionsebene angepassten Maschinenbelegungsplan dar.

7.4 Simulationstechnische Validierung

Das Ziel, welches mit dem System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung verfolgt wird, ist die Steigerung der Qualität der zur Planung verwendeten Wissensgrundlage, was folglich zu realistischen Maschinenbelegungsplänen und einer Steigerung der Liefertreue führt (vgl. Abschnitt 1.3). Die Validierung erfolgt mit Hilfe des in Abschnitt 7.2.3 beschriebenen Simulationsmodells anhand des Zielsystems der Produktionsplanung und -steuerung (vgl. Abschnitt 2.3.2). Hierbei stellt die Termintreue das wichtigste Bewertungskriterium dar, da diese als einzige Zielgröße eine Aussage über die erfolgreiche Umsetzung des Maschinenbelegungsplans in der Produktionsebene erlaubt.

Für die Validierung des entwickelten Systems wurden hierzu Maschinenbelegungspläne im Planungssystem erzeugt und mit dem Simulationsmodell umgesetzt. Hierbei wurden bei der Terminierung von jeweils 100 Aufträgen in 4 Produktvarianten mit jeweils 6 Arbeitsvorgängen die folgenden drei Planungsarten betrachtet:

- Planung mit statischen Stammdaten (entspricht Referenzmodell)
- Planung mit dynamischen Stammdaten
- Planung mit dynamischen Stammdaten und wissensbasierte Adaption der DLZ-Anteile

Für die Generierung einer ausreichend großen Anzahl an Ist-Daten wurden für die beiden letztgenannten Planungsarten jeweils 5 Simulationsläufe durchgeführt. Die Aktualisierung der dynamischen Stammdaten sowie des Produktionswissens in der dritten Planungsart erfolgt im Vorfeld jedes neuen Simulationslaufes. In

Abbildung 84 sind für die drei Planungsarten die nach Vorgabe des Maschinenbelegungsplanes fertigzustellenden wie auch die tatsächlich fertiggestellten Produktionsaufträge sowie die daraus resultierende Termintreue für den betrachteten Planungshorizont von 12 Stunden dargestellt. Hierbei ergibt sich der dargestellte Wert jeweils aus dem letzten Simulationslauf.

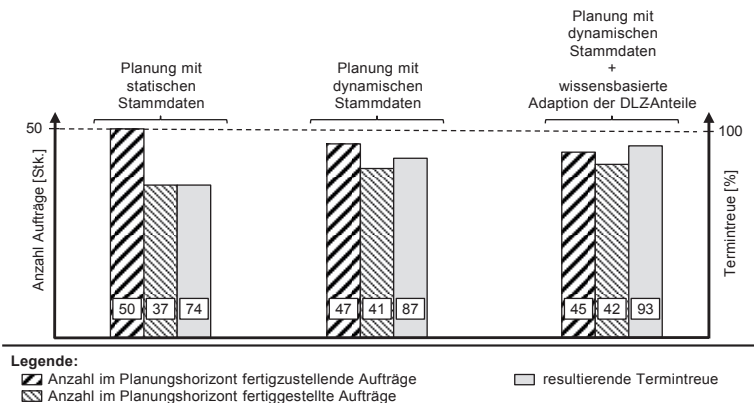


Abbildung 84: Gegenüberstellung der Ergebnisse der unterschiedlichen Planungsarten (hier Betrachtung der Termintreue)

Dabei lässt sich eine deutliche Steigerung der Termintreue von 74 % auf 93 % feststellen. Diese basiert zum einen darauf, dass durch die gesteigerte Informationsqualität die verwendeten Planzeiten der einzelnen DLZ-Anteile einen deutlich höheren Übereinstimmungsgrad mit den tatsächlichen Durchführungszeiten aufweisen. Das wiederum wirkt sich auf die Reduktion von Stillstandzeiten von Fertigungsmitteln aus, welche auf Grund fehlenden Materials zum erwarteten Zeitpunkt entstehen. Zum anderen wird die Termintreue erhöht, da durch die realistischeren Maschinenbelegungspläne auch eine realisierbare Anzahl an Produktionsaufträgen je Planungshorizont festgelegt wird. Im vorliegenden Fall ist dies mit einer Reduktion der Anzahl fertigzustellender Produktionsaufträge von 50 auf 45 im betrachteten Planungshorizont verbunden.

Die bereits angesprochene Reduktion von Stillstandzeiten auf Grund fehlenden Materials hat zudem einen positiven Einfluss auf die Durchlaufzeit von Fertigungsaufträgen. So konnte eine Reduzierung der durchschnittlichen Durchlaufzeit um 4 % festgestellt werden. Eine Aussage über den Bestand und die Auslas-

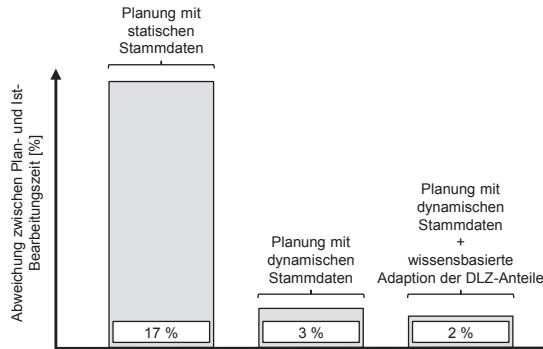


Abbildung 85: Vergleich des Abweichungsverhältnisses infolge der gesteigerten Informationsqualität

ung erfolgt an dieser Stelle nicht, da über beide Zielgrößen keine belastbaren Veränderungen im Rahmen der Simulationsstudien festgestellt wurden.

Die Veränderung der Informationsqualität entsprechend der unterschiedlichen Planungsarten lässt sich zudem durch die Betrachtung des Abweichungsverhältnisses zwischen geplanter Durchführungszeit und erfasster Durchführungszeit der DLZ-Anteile beurteilen. In Abbildung 85 ist dies exemplarisch anhand des Bearbeitungsvorgangs von AVO 10 des Auftrags 4 an Fertigungsmittel 2 in Werkstatt 1 dargestellt. In den statischen Stammdaten entsprach die Durchführungsdauer 1500 Sekunden. Durchschnittlich wurden jedoch nur 1232 Sekunden hierzu benötigt. Die Anpassung dieses Planwertes in den dynamischen Stammdaten führte folglich zur Reduktion der Abweichung zwischen Plan- und Ist-Wert von 3 % bzw. 2 % bei zusätzlicher Adaption der DLZ-Anteile durch das WBS-DLZ.

7.5 Bewertung

7.5.1 Allgemeine Bewertung

In den Abschnitten 7.2, 7.3 und 7.4 wurde die prototypische Umsetzung und Validierung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung in einem Soft- und Hardware-Demonstrator beschrieben. Damit konnten die technische Machbarkeit sowie die Leistungsfähigkeit des entwickelten Systems

nachgewiesen werden. Anhand der in Abschnitt 3.5 zugrundegelegten allgemeinen und spezifischen Anforderungen an ein PPS-System für die auftragsbezogene Produktion, erfolgt nun die Bewertung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung.

Die Handhabung eines sich ständig wandelnden Produktionsprogrammes ist sowohl durch das entwickelte Datenmodell als auch den Belegungsalgorithmus möglich. Die formale Beschreibung der produktseitigen Anforderungen (Auftragsmodell) und die betriebsmittelseitigen Fähigkeiten (Ressourcenmodell) erlauben es, erst unmittelbar vor der Terminierung das Fertigungsmittel festzulegen. Dadurch ist es möglich, Produkte auf unterschiedlichen Fertigungsmitteln sowie, wenn technisch möglich, mit anderen Technologien herzustellen.

Die Anpassbarkeit des entwickelten Systems an sich verändernde Produktionsumgebungen bzw. -bedingungen ist durch unterschiedliche Aspekte gewährleistet. Zum einen lassen sich durch das Ressourcenmodell alle relevanten Arten von Betriebsmitteln modellieren und im Produktionsmodell zu Werkstätten kombinieren. Auf diese Art können Veränderungen in der Produktionsebene mit einem minimalen Aufwand im Datenmodell umgesetzt und direkt für die Maschinenbelegungsplanung nutzbar gemacht werden. Zum anderen bietet die Erfassung der Auftragsdaten durch den Einsatz der RFID-Technologie und die damit einhergehende Verwendung intelligenter Produkte eine technische Lösung, welche beliebig skalierbar ist. Die auf den erfassten Daten basierende kontinuierliche Stammdatenaktualisierung sowie die Ableitung und Verwendung des fall- und regelbasierten Produktionswissens führt zudem dazu, dass die Zeitparameter der DLZ-Anteile den aktuell vorliegenden Bedingungen in der Produktionsebene entsprechen.

Durch die gewählte Art der produktbasierten Offline-Betriebsdatenerfassung ist gewährleistet, dass jeder DLZ-Anteil akkurat und vollständig aufgenommen wird. Dies betrifft die lückenlose Speicherung aller Liege-, Transport- Rüst- und Bearbeitungsvorgänge. Durch die Ergänzung jedes DLZ-Anteils um den zum Zeitpunkt der Durchführung vorliegenden Produktionszustand ist es zudem möglich, implizit vorliegende Zusammenhänge durch den Einsatz von Data Mining Methoden zu identifizieren und in Form des regelbasierten Produktionswissens der Maschinenbelegungsplanung zur Verfügung zu stellen. Der damit integrierte KDD-Prozess ermöglicht durch die realisierte Durchgängigkeit sowie Strukturiertheit der Daten die Durchführung von Analyseoperationen auch bei sehr großen Datenmengen.

Der entwickelte Algorithmus, welcher zwei nicht-optimierende Verfahren zur Maschinenbelegungsplanung vereint, verwendet sowohl dynamische Stammdaten als auch Produktionswissen zur Erzeugung von qualitativ hochwertigen Belegungsplänen. Die sich kontinuierlich aktualisierenden Stammdaten ermöglichen zudem, durch den Einsatz eines spezifischen Sicherheitszuschlages, die aleatorischen Unsicherheiten in den Daten zu berücksichtigen. Zum anderen führt die wissensbasierte Adaption von DLZ-Anteilen auf Basis des zu erwartenden Produktionszustandes wie auch weiterer identifizierter impliziter Zusammenhänge zu Maschinenbelegungsplänen mit einer hohen Eintrittswahrscheinlichkeit und reduziert damit die epistemische Datenunsicherheit. Hierzu wird das DLZ-Anteil-bezogene, das ressourcenbezogene, das auftragsfolgebezogene und das allgemeine Produktionswissen verwendet, welches in fall- und regelbasierter Form bereitgestellt wird.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung die in Abschnitt 3.5 genannten Anforderungen erfüllt.

7.5.2 Wirtschaftliche Bewertung

Grundsätzlich erfolgt eine wirtschaftliche Bewertung durch ein Gegenüberstellen von Aufwand und Nutzen. Jedoch lassen sich im Fall der Betrachtung von Informationssystemen sowie der RFID-Technologie die Investitionen nicht als betriebswirtschaftlicher Standardfall betrachten (AHLERT ET AL. 1998, VILKOV & WEIB 2008) und sind momentan Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten (z. B. REINHART ET AL. 2011b). Des Weiteren erfordert die quantitative Bewertung der Wirtschaftlichkeit des entwickelten Systems eine hohe Anzahl an Annahmen hinsichtlich des Vergleichsszenarios, was somit in keinem belastbaren Ergebnis resultiert. Daher wird in Anlehnung an die VDI-Richtlinie 5600 Blatt 2, welche die Kosten- und Nutzenfaktoren von MES behandelt, im Folgenden ausschließlich eine qualitative Bewertung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung erfolgen.

Die erforderlichen *Aufwände* für Einführung und Betrieb des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung lassen sich entsprechend den Projektphasen eines Integrationsprojektes zuordnen und bestehen aus einmaligen wie auch laufenden Kosten. Die *einmaligen Kosten* werden in der Vorbereitungsphase, der Einführungsphase und nach dem Produktivstart verursacht. In

Bezug auf das entwickelte System sind hierbei Kosten für die Systemauswahl (u. a. Lasten-/ Pflichtenheft), für Hardware (u. a. Systemplattform, Datenbankserver, Computer, RFID-Transponder und -antennen), für Software (u. a. Lizenzen PPS-System und Datenbank) sowie für Personal (u. a. Projektleitung, Consulting, Programmierung, Systemlieferant, Customizing, Schulung der Mitarbeiter) erforderlich. Die *laufenden Kosten* treten während dem Betrieb des Systems auf. Diese lassen sich in allgemeine Betriebskosten (u. a. Energie) sowie Kosten für Hardware (u. a. Wartung, RFID-Transponder und -antennen), für Software (u. a. Lizenzen) wie auch für Personal (u. a. Systemadministration, Anwendung des Systems) unterteilen.

Der *Nutzen*, welcher durch den Einsatz des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung realisiert werden kann, hat sowohl quantifizierbare als auch nicht quantifizierbare Aspekte. Wie in Abschnitt 7.4 durch die simulationstechnische Validierung nachgewiesen, wird durch das entwickelte System eine hohe Termintreue realisiert. Jedoch ist dies nicht zwangsläufig mit einer gesteigerten Ausbringung und somit einem quantifizierbaren höheren Gewinn gleichzusetzen. Daher können an dieser Stelle nur nicht quantifizierbare Aspekte, wie z. B. die Vermeidung von Strafzahlungen in Folge der nicht fristgerechten Lieferung auf Basis der Lieferzusage oder auch die Kundenzufriedenheit als Bewertungskriterium herangezogen werden. Überdies lässt sich durch die automatisierte, fehlerfreie und exakte Aufnahme von Betriebsdaten mit Hilfe des intelligenten Produktes und die Betrachtung des Produktionszustandes der Aufwand zur Kennzahlenbildung reduzieren. Die dadurch realisierte höhere Transparenz in der Werkstattfertigung ermöglicht es überdies, bessere strategische und normative Unternehmensentscheidungen zu treffen, welche dem Offline-Betriebsdatenerfassungssystem nicht direkt zugeordnet werden können. Des Weiteren ist das zu hebende Potential durch eine kontinuierliche Adaption der Stammdaten als auch die Ableitung und Verwendung von Produktionswissen maßgeblich von der vorliegenden Datenqualität abhängig. Folglich divergiert der quantifizierbare Nutzen des entwickelten Systems sehr stark.

Die vorangegangenen Ausführungen machen deutlich, dass für eine fundierte wirtschaftliche Bewertung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung eine Vielzahl von unternehmens- und anwendungsspezifischen Rahmenbedingungen zu berücksichtigen ist, was eine umfangreiche Analyse erfordert. Daher kann an dieser Stelle keine allgemeingültige Bewertung der Wirtschaftlichkeit des entwickelten Systems stattfinden.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wird ein System zur Maschinenbelegungsplanung in der auftragsbezogenen Produktion beschrieben, welches realistische Maschinenbelegungspläne erzeugt und damit zu einem hohen Lieferterminerfüllungsgrad beiträgt. Hierzu erfolgt zunächst eine Betrachtung der erforderlichen Grundlagen in den Bereichen Flexibilität in der Produktion, Produktionsplanung und -steuerung, Daten- und Informationsmanagement in der auftragsbezogenen Produktion, Kennzahlen und Kennzahlensysteme sowie der technischen Wissensverarbeitung.

Im Hinblick auf die Zielstellung der Arbeit wird der Stand der Technik und Forschung in den Bereichen Betriebsdatenerfassung mit intelligenten Produkten, Steigerung der Stammdatenqualität und Optimierung der Maschinenbelegung betrachtet. Auf Grundlage der Diskussion von verschiedenen Ansätzen in den vorgenannten Gebieten wird der Forschungsbedarf abgeleitet und allgemeine wie auch spezifische Anforderungen an ein PPS-System für die auftragsbezogene Produktion formuliert. Darauf aufbauend wird das System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung entwickelt, welches aus drei Teilsystemen und einem Datenmodell besteht. Diese sind das Offline-Betriebsdatenerfassungssystem, das Auftragsdaten-Analysesystem und das wissensbasierte Planungssystem sowie die produktspezifischen Auftragsdaten.

Die produktspezifischen Auftragsdaten haben die Aufgabe, alle Daten für die wissensbasierte Maschinenbelegungsplanung strukturiert zu verwalten und ermöglichen somit eine durchgängige Verwendung von der Betriebsdatenaufnahme über deren Analyse bis hin zu Planungstätigkeiten. Sie bestehen aus drei Teilmodellen. Das Auftragsmodell dient der Modellierung von Produktionsaufträgen und dem spezifischen Entstehungsprozess von Produkten. Mit Hilfe des Ressourcenmodells lassen sich Fähigkeiten und die Konfiguration von Betriebsmitteln beschreiben. Das Produktionsmodell ermöglicht es, die Struktur und das Layout der Produktionsebene zu modellieren.

Das Offline-Betriebsdatenerfassungssystem verwendet die Fähigkeiten der Identifikation und Datenspeicherung von intelligenten Produkten (unter Verwendung der RFID-Technologie) zur automatisierten Aufnahme von Auftragsdaten in der Produktionsebene. Aufbauend auf den erfassten Daten lassen sich produktionszustandsbeschreibende Kennzahlen für die einzelnen DLZ-Anteile bilden, welche eine Aussage über die Leistungserbringung der betrachteten Produktion ermögli-

chen. Aufgrund der hohen Skalierbarkeit des Offline-BDE-Systems eignet es sich zur Anwendung in sich verändernden Produktionsumgebungen, wie es bei der Werkstattfertigung der Fall ist.

Mit Hilfe des Auftragsdaten-Analysesystems lässt sich eine qualitativ hochwertige Datengrundlage für die Maschinenbelegungsplanung bereitstellen, welche die darin liegende Unsicherheit minimiert bzw. berücksichtigt. Einerseits erfolgt dies durch die kontinuierliche Aktualisierung der Stammdaten und die damit einhergehende Generierung von dynamischen Stammdaten. Hierbei werden auf Grundlage der aufgenommenen DLZ-Anteile passende Wahrscheinlichkeitsverteilungen erzeugt und in die Stammdaten überführt. Andererseits wird das implizit in den produktspezifischen Auftragsdaten enthaltene Produktionswissen extrahiert und in Form von Regeln und Fällen dem Planungssystem zur Verfügung gestellt.

Das wissensbasierte Planungssystem legt die Maschinenbelegung entsprechend des zu erwartenden Produktionszustandes sowie weiterer impliziter Zusammenhänge (z. B. Auftragsfolge) mit Hilfe des zuvor erworbenen fall- wie auch regelbasierten Produktionswissens fest. Zu diesem Zweck sind zwei nicht-optimierende Verfahren derart miteinander verknüpft, dass ein Maschinenbelegungsplan mit einer hohen Planungsqualität in einer adäquaten Berechnungszeit erzeugt wird. Zum einen wird ein konventioneller, auf Prioritätsregeln basierender Algorithmus eingesetzt, um die Produktionsaufträge auf die zur Verfügung stehenden Fertigungsmittel für den betrachteten Planungshorizont zu terminieren. Zum anderen erfolgt durch die Verwendung eines Verfahrens der Künstlichen Intelligenz, hier ein speziell entwickeltes wissensbasiertes System, eine Adaption der Durchführungsdauer der zuvor eingeplanten DLZ-Anteile gemäß dem jeweils prognostizierten Produktionszustand als auch auftragsfolgebezogener Zusammenhänge. Das Ergebnis ist ein qualitativ hochwertiger Maschinenbelegungsplan, welcher eine hohe Eintrittswahrscheinlichkeit gewährleistet.

Im Rahmen der prototypischen Umsetzung des Systems zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung in einer produktionstechnischen Versuchsanlage wie auch in einem Simulationsmodell konnte die generelle Anwendbarkeit sowie die Realisierung einer hohen Termintreue nachgewiesen werden. Dabei konnte zum einen gezeigt werden, dass die kontinuierliche Aktualisierung der Zeitparameter der einzelnen DLZ-Anteile (dynamische Stammdaten) einen wesentlichen Beitrag zur Erstellung von realistischen Belegungsplänen leistet. Zum anderen wurde nachgewiesen, dass durch die Berücksichtigung des fall- und regelbasierten Produktionswissens bei der Festlegung von Terminierungsparametern deren

Gültigkeit entsprechend des zu erwartenden Produktionszustandes sichergestellt wird.

Innerhalb der vorliegenden Arbeit wurde das Ziel einer hohen Termintreue in der auftragsbezogenen Produktion durch die Bereitstellung einer qualitativ hochwertigen Datengrundlage realisiert. Dabei lag der Fokus vornehmlich auf den Zeitparametern der DLZ-Anteile. Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich daher für die zusätzliche Betrachtung der Fähigkeiten von Fertigungsmitteln in der Maschinenbelegungsplanung. Dies beinhaltet neben der Verwendung von weiteren Wissensarten (z. B. Werkzeugverhalten) auch die Berücksichtigung der Möglichkeit der (Re-) Konfiguration von Fertigungsmitteln. Zudem ist von Interesse, in welcher Art und Weise das generierte Produktionswissen auch im Rahmen der Produktionssteuerung eingesetzt werden kann. Des Weiteren ist es erforderlich, die aus den dynamischen Stammdaten resultierenden Auswirkungen auf andere Unternehmensbereiche, welche ebenfalls auf die Zeitparameter zugreifen, zu untersuchen.

9 Literatur

AAMODT & PLAZA 1994

Aamodt, A.; Plaza, E.: Case-based reasoning; Foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI Communications* 7 (1994) 1, S. 39-59.

ABELE & REINHART 2011

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

ADAM 1998

Adam, D.: *Produktions-Management.* 9. Aufl. Wiesbaden: Gabler 1998. ISBN: 9783409691178.

AHLERT ET AL. 1998

Ahlert, D.; Becker, J.; Olbrich, R.; Schütte, R. (Hrsg.): *Informationssysteme für das Handelsmanagement. Konzepte und Nutzung in der Unternehmenspraxis.* Berlin Heidelberg: Springer 1998. ISBN: 354063584X.

AICHELE 1997

Aichele, C.: *Kennzahlenbasierte Geschäftsprozeßanalyse.* Diss. Universität des Saarlandes. Wiesbaden: Gabler 1997. ISBN: 9783322844996. (Schriften zur EDV-orientierten Betriebswirtschaft).

ALPAR & NIEDEREICHHOLZ 2000

Alpar, P.; Niedereichholz, J. (Hrsg.): *Data Mining im praktischen Einsatz. Verfahren und Anwendungsfälle für Marketing, Vertrieb, Controlling und Kundenunterstützung.* 1. Aufl. Braunschweig: Vieweg 2000. ISBN: 3528057483.

ARNOLD ET AL. 2007

Arnold, D.; Isermann, H.; Kuhn, A.; Tempelmeier, H.; Furmans, K. (Hrsg.): *Handbuch Logistik.* 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 9783540729280.

BATANOV ET AL. 1993

Batanov, D.; Nagarur, N.; Nitikhunkasem, P.: EXPERT-MM: A knowledge-based system for maintenance management. *Artificial Intelligence in Engineering* 8 (1993) 4, S. 283-291.

BECKERT & HUDETZ 2002

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

BEEKMANN & CHAMONI 2010

Beekmann, F.; Chamoni, P.: Verfahren des Data Mining. In: Chamoni, P. et al. (Hrsg.): Analytische Informationssysteme. Business-Intelligence-Technologien und -Anwendungen. 4. Aufl. Berlin: Springer 2010, S. 263-282. ISBN: 9783642048159.

BEIERLE & KERN-ISBERNER 2008

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

BELZ & MERTENS 1996

Belz, R.; Mertens, P.: Combining knowledge-based systems and simulation to solve rescheduling problems. Decision Support Systems 17 (1996) 2, S. 141-157.

BERNARD 2011

Bernard, T.: Entscheidungsunterstützung durch Data-Mining-Werkzeuge. SPS-Magazin 2011 (2011) 5, S. 608-763.

BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT GMBH 2013

Bibliographisches Institut GmbH (Hrsg.): duden.de. Definition des Wortes "Zustand". <<http://www.duden.de/node/687900/revisions/1263453/view>> -19.01.2013.

BIBLIOGRAPHISCHES INSTITUT GMBH 2010

Bibliographisches Institut GmbH (Hrsg.): Duden. Das Fremdwörterbuch. 10. Aufl. Mannheim: Dudenverlag 2010. ISBN: 9783411040605. (Der Duden in 12 Bänden, Nr. 5).

BIENIEK 2001

Bieniek, C.: Prozessorientierte Produktkonfiguration zur integrierten Auftragsabwicklung bei Variantenfertigern. Diss. Technische Universität Carolo-Whilhemina zu Braunschweig. Aachen: Shaker 2001. ISBN: 3826589378. (Schriftenreihe des IFU, Nr. 001).

BILSING 2007

Bilsing, A.: Kennzahlengestützte Bewertung der technologischen Leistungsfähigkeit der Fertigung im Werkzeug- und Formenbau. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker 2007. ISBN: 9783832261542. (Berichte aus der Produktionstechnik, Nr. 11/2007).

BLUMBERG 1991

Blumberg, F.: Wissensbasierte Systeme in Produktionsplanung und -steuerung. Implementierungs- und Integrationsaspekte, dargestellt an einem Beispiel aus dem Beschaffungsbereich. Diss. Universität Hohenheim. Heidelberg: Physica 1991. ISBN: 3790805572. (Wirtschaftswissenschaftliche Beiträge, Nr. 54).

BOERSCH ET AL. 2007

Boersch, I.; Heinsohn, J.; Socher-Ambrosius, R.: Wissensverarbeitung. Eine Einführung in die Künstliche Intelligenz für Informatiker und Ingenieure. 2. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2007. ISBN: 9783827418449.

BREIMAN ET AL. 1984

Breiman, L.; Friedman, J. H.; Olshen, R. A.; Stone, C. J.: Classification and regression trees. 1. Aufl. New York, N.Y.: Chapman and Hall/CRC 1984. ISBN: 9780412048418.

BREITHAUPT 2001

Breithaupt, J.-W.: Rückstandsorientierte Produktionsregelung von Fertigungsbereichen. Grundlagen und Anwendung. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI Verlag 2001. ISBN: 3183571021. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Nr. 571).

BRINZER 2005

Brinzer, B.: Produktionsregelung für die variantenreiche Serienfertigung. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2005. ISBN: 3936947589. (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) 2, S. 114-117.

BULLINGER & TEN HOMPEL 2007

Bullinger, H.-J.; ten Hompel, M.: Internet der Dinge. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2007. ISBN: 9783540367291.

BURKHALTER 2010

Burkhalter, J. P.: Steuerungs- und Regelungsstrategien für produktionstechnische Systeme. Grundlagen und Herleitung einer Verfahrensstrategie zur gezielten Kontrolle der produktionslogistischen Zielgrößen. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Saarbrücken: Südwestdeutscher Verlag für Hochschulschriften 2010. ISBN: 9783838119069.

CALANTONE ET AL. 2003

Calantone, R.; Garcia, R.; Dröge, C.: The Effects of Environmental Turbulence on New Product Development Strategy Planning. *Journal of Product Innovation Management* 20 (2003) 2, S. 90-103.

CHEN ET AL. 2005

Chen, W.-C.; Tseng, S.-S.; Wang, C.-Y.: A novel manufacturing defect detection method using association rule mining techniques. *Expert Systems with Applications* 29 (2005) 4, S. 807-815.

CHOUDHARY ET AL. 2009

Choudhary, A. K.; Harding, J. A.; Tiwari, M. K.: Data mining in manufacturing: a review based on the kind of knowledge. *Journal of Intelligent Manufacturing* 20 (2009) 5, S. 501-521.

CORSTEN & GÖSSINGER 2009

Corsten, H.; Gössinger, R.: *Produktionswirtschaft. Einführung in das industrielle Produktionsmanagement*. 12. Aufl. München: Oldenbourg 2009. ISBN: 9783486587517.

DANGELMAIER 2009

Dangelmaier, W.: *Theorie der Produktionsplanung und -steuerung. Im Sommer keine Kirschpralinen?*. Berlin Heidelberg: Springer 2009. ISBN: 9783642006326. (VDI-Buch).

DE TONI & TONCHIA 1998

de Toni, A.; Tonchia, S.: Manufacturing flexibility: A literature review. *International Journal of Production Research* 36 (1998) 6, S. 1587-1617.

DENKENA 2007

Denkena, B. (Hrsg.): *Gentelligente Bauteile im Lebenszyklus - Nutzung vererbbarer, bauteilinhärenter Informationen in der Produktionstechnik*. Sonderforschungsbereich 653 - 1. Kolloquium Genetik und Intelligenz - Neue Wege in der Produktionstechnik. Hannover: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2007. ISBN: 9783939026464.

DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR INFORMATIONS- UND DATENQUALITÄT E. V. 2013

Deutsche Gesellschaft für Informations- und Datenqualität e. V. (DGIQ) (Hrsg.): *Informationsqualität: 15 Dimensionen, 4 Kategorien*. <<http://88.198.68.171:8080/confluence/download/attachments/111411219/15.+IQ+Dimensionen.pdf?version=1&modificationDate=1301666789000>> - 29.05.2013.

DIEKMANN ET AL. 2007

Diekmann, T.; Melski, A.; Schumann, M.: Data-on-Network vs. Data-on-Tag: Managing Data in Complex RFID Environments. In: Sprague, R. H. (Hrsg.): Proceedings of the 40th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'07). Hawaii, USA, 03.-06.01.2007. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society Press 2007, S. 224-233. ISBN: 9780769527550.

DIMITROV ET AL. 2010

Dimitrov, T.; Baumann, M.; Schenk, M.: Master Data Extraction and Adaptation Based on Collected Production Data in Manufacturing Execution Systems. In: Teti, R. (Hrsg.): Proceedings of the 7th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (ICME). Capri, Italien, 23.-25.06.2010. ISBN: 9788895028651.

DIN 1319-3

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN 1319-3: Grundlagen der Messtechnik. Berlin: Beuth 1996.

DIN 8580

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

DIN EN ISO 9000:2005

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN EN ISO 9000:2005: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe. Berlin: Beuth 2012.

DIN EN ISO 9001:2000

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.): DIN EN ISO 9001:2000: Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen. Berlin: Beuth 2000.

DIN 66001

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

DOMSCHKE 1997

Domschke, W.: Produktionsplanung. Ablauforganisatorische Aspekte. 2. Aufl. Berlin: Springer 1997. ISBN: 3540635602.

DOMSCHKE & DREXL 2007

Domschke, W.; Drexl, A.: Logistik: Transport. Grundlagen, lineare Transport- und Umladeprobleme. 5. Aufl. München: Oldenbourg 2007. ISBN: 9783486582901.

EPPLER & WITTIG 2000

Eppler, M. J.; Wittig, D.: Conceptualizing Information Quality: A Review of Information Quality Frameworks from the Last Ten Years. In: Klein, B. D. et al. (Hrsg.): Proceedings of 5th International Conference on Information Quality (ICIQ 2000). Cambridge, MA, USA, 20.-22.10.2000, S. 83-96.

ERTEL 2009

Ertel, W.: Grundkurs Künstliche Intelligenz. Eine praxisorientierte Einführung. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009. ISBN: 9783834807830.

ESTER & SANDER 2000

Ester, M.; Sander, J.: Knowledge Discovery in Databases. Techniken und Anwendungen. Berlin Heidelberg: Springer 2000. ISBN: 3540673288.

EVERSHEIM 1989

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. ISBN: 318400841X.

FAYYAD ET AL. 1996A

Fayyad, U.; Piatetsky-Shapiro, G.; Smyth, P.: Knowledge Discovery and Data Mining: Towards a Unifying Framework. In: Simoudis, E. et al. (Hrsg.): Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96). Portland, Oregon, USA, 02.-04.08.1996. Menlo Park, CA, USA: AAAI Press 1996, S. 82-88. ISBN: 9781577350040.

FAYYAD ET AL. 1996B

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

FINKENZELLER 2006

Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch. Grundlagen und praktische Anwendungen induktiver Funkanlagen, Transponder und kontaktloser Chipkarten. 4. Aufl. München: Hanser 2006. ISBN: 9783446403987.

FLEISCH & FRIEDEMANN 2005

Fleisch, E.; Friedemann, M. (Hrsg.): Das Internet der Dinge. Ubiquitous Computing und RFID in der Praxis: Visionen, Technologien, Anwendungen, Handlungsanleitungen. Berlin Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 9783540240037.

GE & HELFERT 2007

Ge, M.; Helfert, M.: A Review of Information Quality Research. In: Robbert, M. A. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Conference on Information Quality (ICIQ 2007). Cambridge, MA, USA, 09.-11.2007.

GERWIN 1993

Gerwin, D.: Manufacturing Flexibility: A Strategic Perspective. Management Science 39 (1993) 4, S. 395-410.

GIENKE & KÄMPF 2007

Gienke, H.; Kämpf, R. (Hrsg.): Handbuch Produktion. Innovatives Produktionsmanagement: Organisation, Konzepte, Controlling. 1. Aufl. München: Carl Hanser 2007. ISBN: 9783446410251.

GLOBAL STANDARDS ONE 2011

Global Standards One (GS1) (Hrsg.): EPC Tag Data Standard 1.6. <http://www.gs1.org/gsm/kc/epcglobal/tds/tds_1_6-RatifiedStd-20110922.pdf> - 19.05.2013.

GRÖGER ET AL. 2012

Gröger, C.; Niedermann, F.; Mitschang, B.: Data mining-driven manufacturing process optimization. In: Ao, S. I. (Hrsg.): Proceedings of the World Congress on Engineering (WCE 2012). London, England, 04.-06.07.2012. Hong Kong: Newswood Ltd. 2012, S. 4-6. ISBN: 9789881925220.

GRONAU 1994

Gronau, N.: Führungsinformationssysteme für das Management der Produktion. 1. Aufl. München: Oldenbourg 1994. ISBN: 9783486230505.

GROTH 1992

Groth, U.: Kennzahlensystem zur Beurteilung und Analyse der Leistungsfähigkeit einer Fertigung. Einsatz von personellen, organisatorischen und technischen Kennzahlen. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 9783181461167. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16, Nr. 61).

GÜNTHNER & TEN HOMPEL 2010

Günthner, W.; ten Hompel, M. (Hrsg.): Internet der Dinge in der Intralogistik. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 9783642048951. (VDI-Buch).

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. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2006, S. 63-87. ISBN: 9783540255062.

HACKSTEIN 1989

Hackstein, R.: Produktionsplanung und -steuerung (PPS). Ein Handbuch für die Betriebspraxis. 2. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1989. ISBN: 3184009246.

HAGEDORN ET AL. 1997

Hagedorn, J.; Bissantz, N.; Mertens, P.: Data Mining (Datenmustererkennung): Stand der Forschung und Entwicklung. Wirtschaftsinformatik 39 (1997) 6, S. 601-612.

HARDING ET AL. 2006

Harding, J. A.; Shahbaz, M.; Srinivas; Kusiak, A.: Data Mining in Manufacturing: A Review. Journal of Manufacturing Science and Engineering 128 (2006) 4, S. 969-976.

HEIDERICH 2001

Heiderich, T.: Informationsflüsse nach ungeplanten Ereignissen in der technischen Auftragsabwicklung. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker 2001. ISBN: 9783826596926. (Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Nr. 40).

HILDEBRAND ET AL. 2011A

Hildebrand, K.; Gebauer, M.; Hinrichs, H.; Mielke, M. (Hrsg.): Daten- und Informationsqualität: Auf dem Weg zur Information Excellence. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011. ISBN: 9783834814531.

HILDEBRAND ET AL. 2011B

Hildebrand, K.; Otto, B.; Weisbecker, A. (Hrsg.): Stammdatenmanagement. Heidelberg: dpunkt.verlag 2011. ISBN: 9783898647502. (HMD - Praxis der Wirtschaftsinformatik, Nr. 279).

HINRICHS 2002

Hinrichs, H.: Datenqualitätsmanagement in Data Warehouse-Systemen. Diss. Universität Oldenburg. Oldenburg 2002. <<http://oops.uni-oldenburg.de/279/1/309.pdf>> - 13.10.2014.

HUANG ET AL. 2008

Huang, G. Q.; Zhang, Y.; Chen, X.; Newman, S.: RFID-enabled real-time wireless manufacturing for adaptive assembly planning and control. *Journal of Intelligent Manufacturing* 19 (2008) 6, S. 701-713.

ISO/TS 8000-1:2011

International Organization for Standardization (ISO) (Hrsg.): ISO/TS 8000-1:2011: Data quality -- Part 1: Overview. Berlin: Beuth 2011.

ISO/IEC 15961-1:2013

International Organization for Standardization (ISO) (Hrsg.): ISO/IEC 15961-1:2013: Information technology -- Radio frequency identification (RFID) for item management: Data protocol -- Part 1: Application interface. Berlin: Beuth 2013.

JÄGER 2000

Jäger, M.: Kennliniengestützte Parametereinstellung von PPS-Systemen. Diss. Universität Hannover. Hannover 2000. <<http://d-nb.info/961150181/34>> - 13.10.2014.

JEDERMANN 2009

Jedermann, R.: Autonome Sensorsysteme in der Transport- und Lebensmittellogistik. Diss. Universität Bremen. München: Dr. Hut 2009. ISBN: 9783868532890.

JÜNEMANN & BEYER 1998

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

KAFKA 1999

Kafka, C.: Konzeption und Umsetzung eines Leitfadens zum industriellen Einsatz von Data-Mining. Diss. Universität Karlsruhe. Karlsruhe: Schnelldruck Ernst Grässer 1999. (Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe, Nr. 99).

KALUZA & BLECKER 2004

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: Erich Schmidt 2004, S. 1-28. ISBN: 9783503083671.

KERN 2006

Kern, C.: Anwendung von RFID-Systemen. 2. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540444770. (VDI-Buch).

KLEINE ET AL. 2007

Kleine, O.; Kinkel, S.; Jäger, A.: Flexibilität durch Technologieeinsatz?. Nutzung und Erfolgswirkung flexibilitätsfördernder Technologien. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe: 2007. (Mitteilungen aus der ISI-Erhebung zur Modernisierung der Produktion, Nr. 44).

KLETTI 2006

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

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.

KLUßMANN 2009

Klußmann, J. H.: Einsatzpotenziale des Mobile Computing in der Produktionslogistik von Auftragsfertigern. Diss. Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH 2009. ISBN: 9783941416154. (Berichte aus dem IPH, Nr. 2/2009).

KNETSCH 2004

Knetsch, T.: Unsicherheiten in Ingenieurberechnungen. Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Magdeburg 2004. <http://edoc.bibliothek.uni-halle.de/servlets/MCRFileNodeServlet/HALCoRe_derivate_00002885/thoknetsch.pdf> - 13.10.2014.

KOHN 2005

Kohn, W.: Statistik. Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 9783540216773.

KRCMAR 2010

Krcmar, H.: Informationsmanagement. 5. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2010. ISBN: 9783642042850.

KÜCHLIN & WEBER 2005

Küchlin, W.; Weber, A.: Einführung in die Informatik. Objektorientiert mit Java. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 3540209581. (EXamen.press).

KURBEL 1992

Kurbel, K.: Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen. Eine anwendungsorientierte Einführung in wissensbasierte Systeme. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 1992. ISBN: 9783540552376.

KURBEL 2005

Kurbel, K.: Produktionsplanung und -steuerung im Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management. Methodische Grundlagen von PPS-Systemen und Erweiterungen. 6. Aufl. München Wien: Oldenbourg 2005. ISBN: 3486575783.

KURBEL 2011

Kurbel, K.: Enterprise Resource Planning und Supply Chain Management in der Industrie. 7. Aufl. München: Oldenbourg 2011. ISBN: 9783486596953.

LACHNIT 1976

Lachnit, L.: Zur Weiterentwicklung betriebswirtschaftlicher Kennzahlensysteme. Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung 28 (1976) 4, S. 216-230.

LALLEMENT & ALEXANDRE 1997

Lallement, Y.; Alexandre, F.: Cognitive Aspects of Neurosymbolic Integration. In: Sun, R. et al. (Hrsg.): Connectionist Symbolic Integration. From Unified to Hybrid Approaches. Mahwah, NJ, USA: Lawrence Erlbaum 1997, S. 57-68. ISBN: 0805823484.

LAY ET AL. 2009

Lay, G.; Kinkel, S.; Jäger, A.: Stellhebel für mehr Produktivität. Benchmarking identifiziert Potenziale zur Steigerung der Produktivität. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe: 2009. (Mitteilungen aus der ISI-Erhebung zur Modernisierung der Produktion, Nr. 48).

LEE & PARK 2008

Lee, D.; Park, J.: RFID-based traceability in the supply chain. Industrial Management & Data Systems 108 (2008) 6, S. 713-725.

LINDEMANN ET AL. 2006

Lindemann, U.; Reichwald, R.; Zäh, M. F. (Hrsg.): Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 9783540255062. (VDI-Buch).

LÖDDING 2005

Lödning, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2005. ISBN: 3540202323. (VDI-Buch).

LÖDDING 2008

Lödning, H.: Verfahren der Fertigungssteuerung. Grundlagen, Beschreibung, Konfiguration. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2008. ISBN: 3540768599. (VDI-Buch).

LORENZ 1978

Lorenz, K.: Vergleichende Verhaltensforschung. Grundlagen der Ethologie. 1. Aufl. Wien: Springer 1978. ISBN: 9783211815007.

LOSHIN 2009

Loshin, D.: Master Data Management. 1. Aufl. Amsterdam: Morgan Kaufmann 2009. ISBN: 9780080921211.

LÜSSEM 2011

Lüsse, J.: Organisatorische Ansiedlung eines Datenqualitätsmanagements. In: Hildebrand, K. et al. (Hrsg.): Daten- und Informationsqualität: Auf dem Weg zur Information Excellence. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011, S. 229-240. ISBN: 9783834814531.

MADEY ET AL. 1994

Madey, G.; Weinroth, J.; Shah, V.: Hybrid intelligent systems: Tools for decision making in intelligent manufacturing. In: Dagli, C. H. (Hrsg.): Artificial Neural Networks for Intelligent Manufacturing. Dordrecht: Springer Netherlands 1994, S. 67-90. ISBN: 9789401043076.

MAG 1990

Mag, W.: Grundzüge der Entscheidungstheorie. München: Franz Vahlen 1990. ISBN: 9783800614417. (WiSt Taschenbücher).

MALUCHE 1979

Maluche, C.: Entwicklung eines Kennzahlensystems für den Produktionsbereich auf der Basis sekundär-statistischer Daten. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen 1979.

McFARLANE ET AL. 2003

McFarlane, D.; Sarma, S.; Chirn, J. L.; Wong, C. Y.; Ashton, K.: Auto ID systems and intelligent manufacturing control. *Intelligent Manufacturing* 16 (2003) 4, S. 365-376.

MCKINSEY & COMPANY 2009

McKinsey & Company (Hrsg.): *Made in Germany - Zukunftsperspektiven für die Produktion in Deutschland*. Düsseldorf: 2009.

MERTENS 1990

Mertens, P.: *Expertensysteme in der Produktion. Praxisbeispiele aus Diagnose und Planung. Entscheidungshilfen für den wirtschaftlichen Einsatz*. München: Oldenbourg 1990. ISBN: 9783486215496.

MEYER 2011

Meyer, C.: *Betriebswirtschaftliche Kennzahlen und Kennzahlen-Systeme*. 6. Aufl. Sternenfels: Verlag Wissenschaft & Praxis 2011. ISBN: 9783896735997. (Edition Management).

MICHALSKI & KODRATOFF 1990

Michalski, R. S.; Kodratoff, Y.: *Research in Machine Learning: Recent Progress, Classification of Methods, and Future Directions*. In: Kodratoff, Y. et al. (Hrsg.): *Machine Learning. An Artificial Intelligence Approach (Volume 3)*. San Mateo, CA, USA: Morgan Kaufmann 1990, S. 3-30. ISBN: 1558601198.

MITTAG 2012

Mittag, H.-J.: *Statistik. Eine interaktive Einführung*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum 2012. ISBN: 9783642300905. (Springer-Lehrbuch).

MORYSON 2004

Moryson, R.: *Die systematische, rechnerunterstützte Prozessauswahl und -kettenerstellung in der Grobplanungsphase der Produktionsplanung*. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich. Düsseldorf: VDI-Verlag 2004. ISBN: 3183388200. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20, Nr. 388).

MOSER 1993

Moser, M.: *Regelung der Maschinenbelegung in der flexiblen Fertigung*. Diss. Universität Karlsruhe. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993. ISBN: 3181496200. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20, Nr. 96).

MÖSLEIN-TRÖPPNER 2010

Möslein-Tröppner, B.: Produktionswirtschaftliche Flexibilität in Supply Chains mit hohen Absatzrisiken. Strategische Konzepte und operative Erfolgspotenziale. Diss. Otto-Friedrich-Universität Bamberg. Bamberg: University of Bamberg Press 2010. ISBN: 9783923507887. (Schriftenreihe Logistik und Supply Chain Management, Nr. 1).

MÜLLER 2006

Müller, S.: Ein KI-unterstütztes Durchlaufzeit-, Bestands- und Kapazitätsregelkreiskonzept für die Werkstattfertigung. Diss. Universität Bremen. Berlin: GITO 2006. ISBN: 3936771677. (Informationstechnische Systeme und Organisation von Produktion und Logistik, Nr. 4).

NEIDHARDT 2007

Neidhardt, U.: Einsatz von Prioritätsregeln zur Erreichung ökonomischer Zielstellungen. Diss. Universität Rostock. Aachen: Shaker 2007. ISBN: 9783832264987. (Schriftenreihe des Instituts für Produktionswirtschaft der Universität Rostock).

NORTH 2011

North, K.: Wissensorientierte Unternehmensführung. Wertschöpfung durch Wissen. 5. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2011. ISBN: 9783834925381.

NYHUIS ET AL. 2008

Nyhuis, P.; Heinen, T.; Reinhart, G.; Rimpau, C.; Abele, E.; Wörn, A.: Wandlungsfähige Produktionssysteme. Theoretischer Hintergrund zur Wandlungsfähigkeit von Produktionssystemen. wt Werkstattstechnik online 98 (2008) 172, S. 85-91.

NYHUIS & WIENDAHL 2003

Nyhuis, P.; Wiendahl, H.-P.: Logistische Kennlinien. Grundlagen, Werkzeuge und Anwendungen. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2003. ISBN: 9783540437000.

OH ET AL. 2001

Oh, S.; Han, J.; Cho, H.: Intelligent Process Control System for Quality Improvement by Data Mining in the Process Industry. In: Braha, D. (Hrsg.): Data Mining for Design and Manufacturing. Methods and Applications. Boston, MA: Springer US 2001, S. 289-309. ISBN: 9781441952059.

OSTGATHE 2012

Ostgathe, M.: System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Diss. Technische Universität München. München: Utz 2012. ISBN: 9783831642069. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 265).

PEIRCE 1978

Peirce, C. S.: Deduction, Induction, and Hypothesis. *Popular Science Monthly* (1978) 13, S. 470-482.

PETERMANN 1996

Petermann, D.: Modellbasierte Produktionsregelung. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 1996. ISBN: 3183193205. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 20, Nr. 193).

PFOHL 2010

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

PIAZZA 2010

Piazza, F.: Data Mining im Personalmanagement. Eine Analyse des Einsatzpotenzials zur Entscheidungsunterstützung. 1. Aufl. Wiesbaden: Gabler 2010. ISBN: 9783834922205.

PILLER 2006

Piller, F. T.: Mass Customization. Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. 4. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2006. ISBN: 9783835003552. (Gabler Edition Wissenschaft).

POON ET AL. 2007

Poon, T. C.; Choy, K. L.; Lau, H. C.: A real-time shop floor control system: an integrated RFID approach. *International Journal of Enterprise Network Management* 1 (2007) 4, S. 331-349.

PREIBLER 2008

Preißler, P. R.: Betriebswirtschaftliche Kennzahlen. Formeln, Aussagekraft, Sollwerte, Ermittlungsintervalle. 1. Aufl. München: Oldenbourg 2008. ISBN: 9783486238884.

PUPPE 1991

Puppe, F.: Einführung in Expertensysteme. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 1991. ISBN: 9783540540236. (Studienreihe Informatik).

RECKER 2000

Recker, A.: Losgrößenplanung in PPS-Systemen. Optimierende versus heuristische Verfahren. Diss. Ruhr-Universität Bochum. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2000. ISBN: 9783824471188. (Gabler Edition Wissenschaft).

REFA - VERBAND FÜR ARBEITSSUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E. V. 1991

REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Steuerung Teil 1. 1. Aufl. München: Hanser 1991. ISBN: 9783446163492.

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. 469-493. ISBN: 9783322963505.

REINHART & HABICHT 2001

Reinhart, G.; Habicht, C.: Die wandlungsfähige Fabrik. In: Kopp, R. et al. (Hrsg.): Mass statt Masse: Strategien für Mehrbeschäftigung zwischen Rationalisierung und Kundennähe. Beiträge und Materialien zum Arbeitssymposium des Konvents für Technikwissenschaften. Aachen: Forum Technik und Gesellschaft 2001.

REINHART & GEIGER 2011

Reinhart, G.; Geiger, F.: Adaptive Scheduling by Means of Product-specific Emergence Data. In: de Meyer, A. (Hrsg.): Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2011). Singapur, 06.-09.12.2011. Piscataway, NJ, USA: IEEE 2011, S. 347-351. ISBN: 9781457707384.

REINHART ET AL. 2013

Reinhart, G.; Engelhardt, P.; Geiger, F.; Philipp, T.; Wahlster, W.; Zühlke, D.; Schlick, J.; Becker, T.; Löckelt, M.: Cyber-Physische Produktionssysteme. Produktivitäts- und Flexibilitätssteigerung durch die Vernetzung intelligenter Systeme in der Fabrik. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2, S. 84-89.

REINHART ET AL. 2011A

Reinhart, G.; Engelhart, P.; Genc, E.; Niehues, M.; Ostgathe, M.: Planung und Steuerung von Abläufen in der Automobilindustrie. Ein unternehmensübergreifender Ansatz. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 5, S. 326-331.

REINHART ET AL. 2011B

Reinhart, G.; Irrenhauser, T.; Reinhardt, S.; Reisen, K.: Wirtschaftlicher und ressourceneffizienter durch RFID? ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106 (2011) 4, S. 225-230.

REMPF 2003

Rempp, B.: Regelungstechnische Untersuchung durchsatzgeregelter Produktionssysteme. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2003. ISBN: 3936947198. (ISW Forschung und Praxis, Nr. 146).

ROKACH & MAIMON 2008

Rokach, L.; Maimon, O.: Data Mining with Decision Trees. Theory and Applications. Singapur: World Scientific 2008. ISBN: 9789812771711.

ROMANOWSKI & NAGI 2001

Romanowski, C. J.; Nagi, R.: Analyzing Maintenance Data Using Data Mining Methods. In: Braha, D. (Hrsg.): Data Mining for Design and Manufacturing. Methods and Applications. Boston, MA: Springer US 2001, S. 235-254. ISBN: 9781441952059.

ROSCHMANN 1979

Roschmann, K.: Betriebsdatenerfassung in Industrieunternehmen. Ein Leitfaden zur Einführung und Anwendung der Betriebsdatenerfassung. München: Moderne Industrie 1979. ISBN: 3478347602. (AWV-Schrift, Nr. 251).

RUNKLER 2010

Runkler, T. A.: Data Mining. Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2010. ISBN: 9783834808585.

SÄUBERLICH 2000

Säuberlich, F.: KDD und Data Mining als Hilfsmittel zur Entscheidungsunterstützung. Diss. Universität Fridericiana zu Karlsruhe. Frankfurt am Main: Peter Lang 2000. ISBN: 9783631367353. (Entscheidungsunterstützung für ökonomische Probleme, Nr. 18).

SAVAGE 1996

Savage, C. M.: Fifth generation management. Co-creating through virtual enterprising, dynamic teaming, and knowledge networking. 2. Aufl. Boston: Butterworth-Heinemann 1996. ISBN: 9780750697019.

SCHEER 1995

Scheer, A.-W.: Wirtschaftsinformatik. Referenzmodelle für industrielle Geschäftsprozesse. 6. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 1995. ISBN: 9783540588726.

SCHEIBMAYER ET AL. 2012

Scheibmayer, M.; Cremer, R.; May, J.; Schnittler, V.: STAIRS: Stammdatenmanagement wertorientiert gestalten. UdZ - Unternehmen der Zukunft 13 (2012) 2, S. 30-32.

SCHERER 1997

Scherer, A.: Neuronale Netze. Grundlagen und Anwendungen. Braunschweig: Vieweg + Teubner 1997. ISBN: 9783528054656. (Computational Intelligence).

SCHEUCH ET AL. 2012

Scheuch, R.; Gansor, T.; Ziller, C.: Master Data Management. Strategie, Organisation, Architektur. 1. Aufl. Heidelberg: dpunkt.verlag 2012. ISBN: 9783898648233.

SCHIEF ET AL. 2011

Schief, M.; Kuhn, C.; Zimmermann, B.; Rösch, P.; Waterfeld, W.; Schimmelpfennig, J.; Mayer, D.; Maus, H.; Eichler, J.: The ADiWa Project - on the Way to Just-in-Time Process Dynamics based on Events from the Internet of Things. In: Runtong, R. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS 2011), Volume 4. Beijing, China, 8.-11.06.2011. Lissabon, Portugal: ScitePress 2011, S. 371-377. ISBN: 9789898425560.

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. Deutscher Anteil des Eureka-Factory-Projekts Informan 2000+. Abschlussbericht. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe: 2003.

SCHMIDT & SCHISCHKOFF 1968

Schmidt, H.; Schischkoff, G.: Philosophisches Wörterbuch. 18. Aufl. Stuttgart: Alfred Kröner 1968.

SCHMOLLING 1997

Schmolling, J. R.: Betriebsdatengestütztes PPS-Controlling für die durchlaufzeitorientierte Grobplanung bei Einzel- und Kleinserienfertigung. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Aachen: Shaker 1997. ISBN: 3826530330. (Schriftenreihe Rationalisierung und Humanisierung, Nr. 3).

SCHOLZ-REITER ET AL. 2004

Scholz-Reiter, B.; Windt, K.; Freitag, M.: Autonomous logistic processes: New demands and first approaches. In: Monostori, L. (Hrsg.): Proceedings of 37th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems (ISMS 2004). Budapest, Ungarn, 19.-21.05.2004. Budapest: MTA SZTAKI 2004, S. 357-362. ISBN: 9789632149059.

SCHOLZ-REITER ET AL. 2008

Scholz-Reiter, B.; Beer, C. de; Freitag, M.; Hamann, T.; Rekersbrink, H.; Tervo, J. T.: Dynamik logistischer Systeme. In: Nyhuis, P. (Hrsg.): Beiträge zu einer Theorie der Logistik. Berlin Heidelberg: Springer 2008, S. 109-138. ISBN: 9783540756415.

SCHUBERT & SCHWILL 2011

Schubert, S.; Schwill, A.: Didaktik der Informatik. 2. Aufl. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag 2011. ISBN: 9783827426529.

SCHUH 2006

Schuh, G. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung. Grundlagen, Gestaltung und Konzepte. 3. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 2006. ISBN: 9783540338550.

SCHUH ET AL. 2013A

Schuh, G.; Potente, T.; Hauptvogel, A.: Cyber-physische Feinplanung. Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 4, S. 336-399.

SCHUH ET AL. 2013B

Schuh, G.; Potente, T.; Thomas, C.; Hauptvogel, A.: High Resolution Production Management. Hochauflösende Produktionssteuerung auf Basis kybernetischer Unterstützungssysteme. wt Werkstattstechnik online 103 (2013) 2, S. 96-99.

SCHUH & STICH 2012

Schuh, G.; Stich, V. (Hrsg.): Produktionsplanung und -steuerung 1. Grundlagen der PPS. 4. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg 2012. ISBN: 9783642254222.

SCHUH ET AL. 2013C

Schuh, G.; Stich, V.; Altgott, M.: WInD - Wandlungsfähige Produktionssysteme durch integrierte IT-Strukturen und dezentrale Produktionsplanung und -regelung. Forschungsinstitut für Rationalisierung e.V. an der RWTH Aachen. Aachen: FIR e.V. an der RWTH Aachen 2013. ISBN: 9783943024135. (Edition Forschung, Nr. 11).

SCHUH & WESTKÄMPER 2006

Schuh, G.; Westkämper, E. (Hrsg.): 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.

SCHULDT 2011

Schuldt, A.: Multiagent Coordination Enabling Autonomous Logistics. Diss. Universität Bremen. Berlin Heidelberg: Springer 2011. ISBN: 9783642200915.

SCHULZ ET AL. 1995

Schulz, J.; Weigelt, M.; Mertens, P.: Verfahren der Rechnergestützten Produktionsfeinplanung. Ein Überblick. Wirtschaftsinformatik 37 (1995) 6, S. 594-608.

SCHULZE & DIETRICH 2008

Schulze, A.; Dietrich, E.: Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 6. Aufl. München Wien: Hanser 2008. ISBN: 9783446415256.

SCHWINDT 1994

Schwindt, C.: Vergleichende Beurteilung mehrerer Varianten der Heuristik von Lambrecht und Vanderveken zur Lösung des integrierten Losgrößen- und Ablaufplanungsproblems. Technical report. Institut für Wirtschaftstheorie und Operations Research (WIOR), Karlsruher Institut für Technologie. Karlsruhe 1994. <<http://digbib.ubka.uni-karlsruhe.de/volltexte/1000005896>> - 24.04.2014.

SEIDEL & GARREL 2011

Seidel, H.; Garrel, J. von: Flexibilität in der Produktion kleiner und mittelständischer Unternehmen. wt Werkstattstechnik online 101 (2011) 4, S. 278-279.

SETHI & SETHI 1990

Sethi, A.; Sethi, S.: Flexibility in Manufacturing: A Survey. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems (1990) 2, S. 289-328.

SHANNON & WEAVER 1976

Shannon, C. E.; Weaver, W.: Mathematische Grundlagen der Informationstheorie. 1. Aufl. München: Oldenbourg 1976. ISBN: 9783486398519.

SHEN ET AL. 2000

Shen, L.; Tay, F. E.; Qu, L.; Shen, Y.: Fault diagnosis using Rough Sets Theory. Computers in Industry 43 (2000) 1, S. 61-72.

SHI ET AL. 2012

Shi, J.; Li, Y.; He, W.; Sim, D.: SecTTS: A secure track & trace system for RFID-enabled supply chains. Computers in Industry 63 (2012) 6, S. 574-585.

SIEGWART ET AL. 2010

Siegwart, H.; Reinecke, S.; Sander, S.: Kennzahlen für die Unternehmensführung. 7. Aufl. Bern: Haupt 2010. ISBN: 9783258074856.

SIMON 1984

Simon, H. A.: Why Should Machines Learn? In: Michalski, R. S. et al. (Hrsg.): Machine Learning. An Artificial Intelligence Approach. 1. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 1984, S. 25-37. ISBN: 9783662124079.

SKORMIN ET AL. 2002

Skormin, V.; Gorodetski, V.; Popyack, L.: Data mining technology for failure prognostic of avionics. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems 38 (2002) 2, S. 388-403.

SMITH & MCKEEN 2008

Smith, H. A.; McKeen, J. D.: Developments in Practice XXX: Master Data Management: Salvation Or Snake Oil?. Communications of the Association for Information Systems (2008) 23, S. 63-72.

SOUZA & WILLIAMS 2000

Souza, D. E. d'; Williams, F. P.: Toward a Taxonomy of Manufacturing Flexibility Dimensions. Journal of Operations Management 18 (2000) 5, S. 577-593.

SPATH & WEISBECKER 2009

Spath, D.; Weisbecker, A. (Hrsg.): Stammdatenmanagementsysteme 2009. Eine Marktübersicht zu aktuellen Systemen. Stuttgart: Fraunhofer-Verlag 2009. ISBN: 9783839600344.

SPATH ET AL. 2012A

Spath, D.; Weisbecker, A.; Kokemüller, J. (Hrsg.): Datenqualitätswerkzeuge 2012. Werkzeuge zur Bewertung und Erhöhung von Datenqualität. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2012. ISBN: 9783839603529.

SPATH ET AL. 2012B

Spath, D.; Weisbecker, A.; Kokemüller, J. (Hrsg.): Stammdatenmanagement. Tagungsband des Stuttgart Softwaretechnik Forums 2012, 25. September 2012. Stuttgart: Fraunhofer Verlag 2012. ISBN: 9783839604588.

SPRINGER GABLER VERLAG 2014

Springer Gabler Verlag (Hrsg.): Gabler Wirtschaftslexikon. Stichwort: Informationssystem. <<http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/9241/informationssystem-v14.html>> - 12.10.2014.

SRINIVAS ET AL. 2004

Srinivas, S.; Harding, J. A.; Shabaz, M.: Agent Oriented Planning Using Data Mined Knowledge. In: Thoben, K.-D. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Conference on Concurrent Enterprising (ICE2004). Sevilla, Spanien, 14.-16.06.2004. Nottingham: Centre for Concurrent Enterprising, University of Nottingham 2004, S. 301-307. ISBN: 9780853581284.

STATISTA 2014

Statista (Hrsg.): Exportquote im Maschinenbau in Deutschland in den Jahren 2007 bis 2013. <<http://de.statista.com/statistik/daten/studie/235617/umfrage/exportquote-im-maschinenbau-in-deutschland/>> - 22.07.2014.

STATISTISCHES BUNDESAMT 2014

Statistisches Bundesamt (Hrsg.): Bruttoinlandsprodukt 2013 für Deutschland. Begleitmaterial zur Pressekonferenz am 15. Januar 2014 in Berlin. <https://www.destatis.de/DE/PresseService/Presse/Pressekonferenzen/2014/BIP2013/Pressebroschuere_BIP2013.pdf?__blob=publicationFile> - 22.07.2014.

STEPHAN ET AL. 2010

Stephan, P.; Meixner, G.; Koessling, H.; Floerchinger, F.; Ollinger, L.: Product-mediated communication through digital object memories in heterogeneous value chains. In: Becker, C. (Hrsg.): Proceedings of IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom 2010). Mannheim, Deutschland, 29.03. - 02.04.2010. Piscataway, NJ, USA: IEEE 2010, S. 199-207. ISBN: 9781424453290.

STICKEL 2001

Stickel, E.: Informationsmanagement. München: Oldenbourg 2001. ISBN: 3486255908. (Lehrbücher Wirtschaftsinformatik).

SYSKA 1990

Syska, A.: Kennzahlen für die Logistik. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen. Berlin: Springer 1990. ISBN: 9783540532965. (fir+iaw Forschung für die Praxis, Nr. 31).

THE BOSTON CONSULTING GROUP 2006

The Boston Consulting Group (Hrsg.): Innovationsstandort Deutschland - quo vadis?. München: 2006.

TITTMANN 2003

Tittmann, P.: Graphentheorie. Eine anwendungsorientierte Einführung. München Wien: Fachbuchverlag Leipzig 2003. ISBN: 9783446223431. (Mathematik-Studienhilfen).

UN DATA 2012

UN Data (Hrsg.): Database Gross Value Added (GVA). <<http://data.un.org>> - 16.12.12.

VDI-RICHTLINIE 2815 Blatt 1

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 2815 Blatt 1: Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Einführung, Grundlagen. Düsseldorf: Beuth 1978.

VDI-RICHTLINIE 3633 Blatt 1

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 3633 Blatt 1: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen. Berlin: Beuth 2010.

VDI-RICHTLINIE 4416

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4416: Betriebsdatenerfassung und Identifikation - Identifikationssysteme. Berlin: Beuth 1998.

VDI-RICHTLINIE 4472 Blatt 4

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 4472 Blatt 4: Anforderungen an Transpondersysteme (RFID) zum Einsatz in der Supply Chain - Kosten-Nutzenbewertung von RFID-Systemen in der Logistik. Berlin: Beuth 2009.

VDI-RICHTLINIE 5600 Blatt 1

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 5600 Blatt 1: Fertigungsmanagementsysteme. Berlin: Beuth 2007.

VDI-RICHTLINIE 5600 Blatt 2

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): VDI-Richtlinie 5600 Blatt 2: Fertigungsmanagementsysteme - Wirtschaftlichkeit. Berlin: Beuth 2013.

VDI VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE E. V. 1992

VDI Verein Deutscher Ingenieure e. V. (Hrsg.): Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verlag 1992. ISBN: 3184010066.

VDMA-EINHEITSBLATT 66412-1

VDMA Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (Hrsg.): VDMA-Einheitsblatt 66412-1: Manufacturing Execution Systems (MES) Kennzahlen. Berlin: Beuth 2009.

VDA-EMPFEHLUNG 5501

Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) (Hrsg.): VDA-Empfehlung 5501: RFID im Behältermanagement der Supply Chain. 2008. <https://www.vda.de/dam/vda/publications/1320933310_de_1724709019.pdf> - 10.01.2015.

VDA-EMPFEHLUNG 5510

Verband der Automobilindustrie e. V. (VDA) (Hrsg.): VDA-Empfehlung 5510: RFID zur Verfolgung von Teilen und Baugruppen in der Automobilindustrie. 2008. <https://www.vda.de/dam/vda/publications/1320933467_de_659052801.pdf> - 10.01.2015.

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. 1. Aufl. Heidelberg: Physica-Verlag 2008, S. 275-303. ISBN: 9783790820553.

WANG & STRONG 1996

Wang, R. Y.; Strong, D. M.: Beyond Accuracy: What Data Quality Means to Data Consumers. Journal of Management Information Systems 12 (1996) 4, S. 5-33.

WARNECKE 1996

Warnecke, H.-J.: Die fraktale Fabrik. Revolution der Unternehmenskultur. 2. Aufl. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt 1996. ISBN: 978-3499197086.

WAUER ET AL. 2009

Wauer, M.; Schuster, D.; Meinecke, J.; Janke, T.; Schill, A.: Aletheia - towards a distributed architecture for semantic federation of comprehensive product information. In: Isaiás, P. (Hrsg.): Proceedings of the IADIS International Conference WWW/Internet 2009. Rom, Italien, 19.-22.11.2009. Lissabon, Portugal: IADIS Press 2009, S. 375-378. ISBN: 9789728924935.

WEIGT 1999

Weigt, D.: Ein lernfähiges System zur erfahrungsbasierten Unterstützung der Belegungs- und Reihenfolgeplanung in der Fertigungssteuerung. Diss. Ruhr-Universität Bochum. Aachen: Shaker 1999. ISBN: 3826563212. (Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme, Nr. 99/1).

WESTKÄMPER 2003

Westkämper, E.: Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin Heidelberg: Springer 2003, S. 95-108. ISBN: 9783642624568.

WESTKÄMPER 2006

Westkämper, E.: Einführung in die Organisation der Produktion. 1. Aufl. Berlin: Springer 2006. ISBN: 9783540260394. (Springer-Lehrbuch).

WIENDAHL 2006

Wiendahl, H.-H.: Auftragsmanagement im turbulenten Umfeld. Teil 1 - Anforderungen. wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 4, S. 183-189.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-H.: Situative Konfiguration des Auftragsmanagements im turbulenten Umfeld. Diss. Universität Stuttgart. Heimsheim: Jost-Jetter 2002. ISBN: 3931388875. (IPA-IAO Forschung und Praxis, Nr. 358).

WIENDAHL 1997

Wiendahl, H.-P.: Fertigungsregelung. Logistische Beherrschung von Fertigungsabläufen auf Basis des Trichtermodells. München: Hanser 1997. ISBN: 3446190848.

WIENDAHL 2010

Wiendahl, H.-P.: Betriebsorganisation für Ingenieure. 7. Aufl. München: Hanser 2010. ISBN: 9783446418783.

WIENDAHL ET AL. 2007

Wiendahl, H.-P.; ElMaraghy, H.; Nyhuis, P.; Zäh, M.; Wiendahl, H.-H.; Duffie, N.; Brieke, M.: Changeable Manufacturing - Classification, Design and Operation. CIRP Annals - Manufacturing Technology 56 (2007) 2, S. 783-809.

WILDEMANN 2012

Wildemann, H.: Variantenmanagement. Leitfaden zur Komplexitätsreduzierung, -beherrschung und -vermeidung. 20. Aufl. München: TCW 2012. ISBN: 9783929918175.

WINKLER 1996

Winkler, R. L.: Uncertainty in probabilistic risk assessment. Reliability Engineering & System Safety 54 (1996) 2-3, S. 127-132.

WITTEN & FRANK 2005

Witten, I. H.; Frank, E.: Data Mining. Practical Machine Learning Tools and Techniques. 2. Aufl. San Francisco, USA: Morgan Kaufman 2005. ISBN: 9780120884070.

WÖHE & DÖRING 2010

Wöhe, G.; Döring, U.: Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 24. Aufl. München: Vahlen 2010. ISBN: 9783800637959.

XU ET AL. 2002

Xu, H.; Nord, J. H.; Brown, N.; Nord, G. D.: Data quality issues in implementing an ERP. Industrial Management & Data Systems 102 (2002) 1, S. 47-58.

YU 2001

Yu, K.-W.: Terminkennlinie. Eine Beschreibungsmethodik für die Terminabweichung im Produktionsbereich. Diss. Universität Hannover. Düsseldorf: VDI-Verlag 2001. ISBN: 3183576023. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2, Nr. 576).

ZAEH & OSTGATHE 2009

Zaeh, M. F.; Ostgathe, M.: A Multi-Agent-supported, Product-based Production Control. In: IEEE (Hrsg.): Proceedings of IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA 2009). Christchurch, Neuseeland, 09.-11.12.2009. Piscataway, NJ: IEEE 2009, S. 2376-2383. ISBN: 9781424447077.

ZÄH ET AL. 2006

Zäh, M. F.; Franzkowiak, M.; Rimpau, C.; Hoffmann, H.; Träger, M.: Innovative Strategien für die Produktion der Zukunft. In: Zäh, M. et al. (Hrsg.): Tagungsband Münchener Kolloquium 2006. Garching, 09.-10.03.2006. München: Utz 2006, S. 109-133. ISBN: 3831605750.

ZÄPFEL & BRAUNE 2005

Zäpfel, G.; Braune, R.: Moderne Heuristiken der Produktionsplanung. Am Beispiel der Maschinenbelegung. München: Vahlen 2005. ISBN: 3800632381. (WiSo-Kurzlehrbücher: Reihe Betriebswirtschaft).

ZBIB ET AL. 2008

Zbib, N.; Raileanu, S.; Sallez, Y.; Berger, T.; Trentsaux, D.: From passive products to intelligent products: the augmentation module concept. In: Bernard, A. (Hrsg.): 5th International Conference on Digital Enterprise Technology. Nantes, Frankreich, 22.-24.10.2008. Paris, Frankreich: Publibook 2008, S. 243-259. ISBN: 9782748345988.

ZELEWSKI ET AL. 2008

Zelewski, S.; Hohmann, S.; Hügens, T.: Produktionsplanungs- und -steuerungssysteme. Konzepte und exemplarische Implementierungen mithilfe von SAP R/3. München: Oldenbourg 2008. ISBN: 9783486587227. (Lehr- und Handbücher der Betriebswirtschaftslehre).

ZETLMAYER 1994

Zetlmayer, H.: Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion. Diss. Technische Universität München. Berlin: Springer 1994. ISBN: 3540581340. (Forschungsberichte *iwb*, Nr. 74).

ZIMBARDO ET AL. 1992

Zimbardo, P. G.; Hoppe-Graff, S.; Keller, B.: Psychologie. 5. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer 1992. ISBN: 9783540539681. (Springer-Lehrbuch).

10 Anhang

10.1 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*) Studienarbeiten betreut. Diese haben sich mit Fragestellungen der Produktionsplanung und -steuerung im Allgemeinen und der wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung im Speziellen befasst. Inhalte und Erkenntnisse aus diesen Arbeiten sind teilweise in die vorliegende Dissertation eingegangen. Der Autor dankt den Studierenden für Ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit. Im Folgenden sind die Studienarbeiten in alphabetischer Reihenfolge des Nachnamens der Autoren aufgeführt:

HELMTS 2012

Helmts, J.-H.: Entwicklung einer Methode zur Bewertung des Produktionszustandes auf Basis von Produktionsplänen, eingereicht im Oktober 2012. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 6.4.3 eingegangen.

HOCK 2012

Hock, S.: Entwicklung und Umsetzung einer Methode für die Analyse produktspezifischer Entstehungsdaten, eingereicht im September 2012. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 5.3.3.3 eingegangen.

HÖPFINGER 2012

Höpfinger, A.: Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur Bereitstellung dynamischer Stammdaten von PPS-Systemen, eingereicht im September 2012. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 6.4.4 eingegangen.

HRISTOPOULOS 2012

Hristopoulos, A.: Konzeption und Implementierung eines Simulationsmodells einer Werkstattfertigung, eingereicht im Oktober 2012. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 7.2.3 eingegangen.

LIEBEROTH-LEDEN 2011

Lieberoth-Leden, C.: Entwicklung und Implementierung eines Konzeptes zur RFID-basierten produktspezifischen Betriebsdatenerfassung, eingereicht im November 2011. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 5.3.3.2 eingegangen.

RIPP 2012

Ripp, T.: Entwicklung und Implementierung eines Planungssystems zur adaptiven Maschinenbelegung, eingereicht im Dezember 2012. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 6.4.2 eingegangen.

RÖMICH 2011

Römich, R.: Bewertung von Datenquellen in der Fabrikebene und Aggregation der enthaltenen Informationen zu produktspezifischen Daten, eingereicht im Mai 2011. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 5.2 eingegangen.

SELIG 2011

Selig, H.: Analyse und Bewertung von Data-Mining Methoden zur Untersuchung von produktspezifischen Entstehungsdaten, eingereicht im November 2011. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 5.4.2.3 eingegangen.

10.2 Verwendete Softwareprodukte

Microsoft Access® – Version 2010

Microsoft Excel® – Version 2010

Microsoft Visual Studio® – Version 10

Microsoft XML Notepad 2007 – Version 2.5

Microsoft Deutschland GmbH, Konrad-Zuse-Straße 1, 85716 Unterschleißheim

RapidMiner Studio – Version 6.0

RapidMiner GmbH, Stockumer Str. 475, 44227 Dortmund

Tecnomatix® Plant Simulation – Version 10.1

Siemens Industrie Software GmbH & Co. KG, Lindenplatz 2, 20099 Hamburg

Visual-XSel® – Version 12.1

CRGRAPH, Hermann-Gmeiner-Weg 8, 81929 München

Seminarberichte IWB

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte IWB sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 1 **Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung**
115 Seiten - ISBN 3-931327-01-9
- 2 **Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt**
82 Seiten - ISBN 3-931327-02-7
- 3 **Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung**
110 Seiten - ISBN 3-931327-03-5
- 4 **Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte**
134 Seiten - ISBN 3-931327-04-3
- 5 **Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung**
95 Seiten - ISBN 3-931327-05-1
- 6 **Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung**
86 Seiten - ISBN 3-931327-06-0
- 7 **Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-07-9
- 8 **Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel**
130 Seiten - ISBN 3-931327-08-7
- 9 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte**
120 Seiten - ISBN 3-931327-09-5
- 10 **3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel**
90 Seiten - ISBN 3-931327-10-8
- 11 **Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
110 Seiten - ISBN 3-931327-11-6
- 12 **Autonome Produktionssysteme**
100 Seiten - ISBN 3-931327-12-4
- 13 **Planung von Montageanlagen**
130 Seiten - ISBN 3-931327-13-2
- 14 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 15 **Flexible fluide Kleb-/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung**
80 Seiten - ISBN 3-931327-15-9
- 16 **Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart**
80 Seiten - ISBN 3-931327-16-7
- 17 **Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen**
80 Seiten - ISBN 3-931327-17-5
- 18 **Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen**
165 Seiten - ISBN 3-931327-18-3
- 19 **Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung**
85 Seiten - ISBN 3-931327-19-1
- 20 **Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme**
105 Seiten - ISBN 3-931327-20-5
- 21 **Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen**
95 Seiten - ISBN 3-931327-21-3
- 22 **Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale**
95 Seiten - ISBN 3-931327-22-1
- 24 **EDM Engineering Data Management**
195 Seiten - ISBN 3-931327-24-8
- 25 **Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele**
152 Seiten - ISBN 3-931327-25-6
- 26 **Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag**
110 Seiten - ISBN 3-931327-26-4
- 27 **Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
111 Seiten - ISBN 3-931327-27-2
- 28 **Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt**
154 Seiten - ISBN 3-931327-28-0
- 29 **Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlussseminar**
156 Seiten - ISBN 3-931327-29-9
- 30 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 31 **Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends**
183 Seiten - ISBN 3-931327-31-0
- 32 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 33 **3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension**
181 Seiten - ISBN 3-931327-33-7
- 34 **Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz**
102 Seiten - ISBN 3-931327-34-5
- 35 **Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben**
129 Seiten - ISBN 3-931327-35-3
- 36 **Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion**
124 Seiten - ISBN 3-931327-36-1
- 37 **Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten - ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten - ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten - ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten - ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten - ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten - ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten - ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten - ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten - ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten - ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten - ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten - ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping - Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten - ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing - Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten - ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten - Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten - ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten - ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen - Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion - Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten - ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion - Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten - ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten - ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion - Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten - ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing - Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten - ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage - Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten - ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme - Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten - ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien - Anspruch - Realität - Technologien
100 Seiten - ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 - Visionen - Umsetzung - Werkzeuge
124 Seiten - ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen - Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten - ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 - Basis für Wachstum - Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten - ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung - Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten - ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme - Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten - ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion - Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten - ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion - Visionen und Methoden zur Kooperation - Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation - Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten - ISBN 3-98675-069-0
- 70 Mechatronik - Strukturndynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten - ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik - Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 - vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 Erfolgsfaktor im Wettbewerb - Erfahrungen - Werkzeuge - Visionen
ISBN 3-89675-072-0 - vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion - Erwartungen - Erfahrungen - Entwicklungen
179 Seiten - ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung - Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten - ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung - Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten - ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis - Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten - ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik - Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten - ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten - ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing - Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten - ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing - Heutige Trends - Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten - ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten - ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik - Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten - ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme - Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten - ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum - Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten - ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing - Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement - Schlink im Mittelstand
102 Seiten - ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik - Vorsprung durch Simulation
134 Seiten - ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion - Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten - ISBN 978-3-89675-089-1
- 90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik - Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten - ISBN 978-3-89675-090-7
- 91 Robotik in der Kleinserienproduktion - Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
- 92 Rapid Manufacturing - Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
- 93 Handhabungstechnik - Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten - ISBN 978-3-89675-093-8
- 94 iwv Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten - ISBN 978-3-89675-094-5
- 95 Zuführtechnik - Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten - ISBN 978-3-89675-095-2
- 96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld - Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten - ISBN 978-3-89675-096-9
- 97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 - Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-097-6

- 98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
- 99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlenschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
- 100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
- 101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
- 102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
- 103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
- 104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
- 105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
- 106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
- 107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte IWB Band 1–121

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen.

- 1 Streifinger, E.: Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 Fuchsberger, A.: Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 Maier, C.: Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrieroboter
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 Summer, H.: Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 Simon, W.: Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 Büchs, S.: Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 Hunzinger, J.: Schneiderorientierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 Pilland, U.: Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 Barthelmeß, P.: Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 Reithofer, N.: Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 Diess, H.: Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 Reinhart, G.: Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungszäse
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 Bürstner, H.: Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 Groha, A.: Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 Riese, K.: Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 Lutz, P.: Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 Klippel, C.: Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 Rascher, R.: Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 Heusler, H.-J.: Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 Kirchknopf, P.: Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 Sauerer, Ch.: Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 Karstedt, K.: Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 Peiker, St.: Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 Schugmann, R.: Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 Wrba, P.: Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 Eibelhäuser, P.: Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 Prasch, J.: Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 Teich, K.: **Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion**
1990 - 52 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfang, W.: **Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze**
1990 - 59 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.: **Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung**
1990 - 93 Abb. - 190 Seiten - ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.: **Systematische Planung komplexer Produktionssysteme**
1991 - 75 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.: **Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme**
1991 - 58 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuzcek, H.: **Inspektion von Karosserieteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung**
1992 - 125 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.: **Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reiraum-Fertigungsgeräten**
1991 - 60 Abb. - 166 Seiten - ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.: **3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen**
1991 - 66 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.: **Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente**
1991 - 85 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.: **Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen**
1991 - 68 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.: **Dynamisches Verhalten von Kreissägen**
1991 - 109 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.: **Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile**
1991 - 86 Abb. - 201 Seiten - ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.: **3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung**
1991 - 74 Abb. - 126 Seiten - ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.: **Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme**
1992 - 108 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.: **Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen**
1992 - 94 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hoßmann, J.: **Methodik zur Planung der automatisierten Montage von nicht formstabilen Bauteilen**
1992 - 73 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-5520-0
- 44 Petry, M.: **Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabkaskens für robotergeführte Klebprozesse**
1992 - 106 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.: **Integrierte Diagnose in Produktionszellen**
1992 - 87 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.: **Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades**
1992 - 70 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.: **Prozßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen**
1992 - 84 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schrüfer, N.: **Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung**
1992 - 103 Abb. - 161 Seiten - ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.: **Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen**
1992 - 77 Abb. - 176 Seiten - ISBN 3-540-55512-9
- 50 Garnich, F.: **Laserbearbeitung mit Robotern**
1992 - 110 Abb. - 184 Seiten - ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.: **Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe**
1992 - 89 Abb. - 159 Seiten - ISBN 3-540-44441-2
- 52 Glaas, W.: **Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung**
1992 - 67 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.: **Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose**
1992 - 60 Abb. - 153 Seiten - ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.: **Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung**
1992 - 75 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.: **Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage**
1992 - 67 Abb. - 135 Seiten - ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bomm, H.: **Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme**
1992 - 87 Abb. - 195 Seiten - ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.: **Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen**
1992 - 74 Abb. - 179 Seiten - ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.: **Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung**
1993 - 67 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.: **Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen**
1993 - 72 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56307-5
- 60 Strohmayr, R.: **Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringeinrichtungen**
1993 - 80 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-56652-X
- 61 Glas, J.: **Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware**
1993 - 80 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3.540-56890-5
- 62 Stetter, R.: **Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrierobotersatzes**
1994 - 91 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-56889-1
- 63 Dirndorfer, A.: **Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage**
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57031-4
- 64 Wiedemann, M.: **Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen**
1993 - 81 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-57177-9
- 65 Woenckhaus, Ch.: **Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung**
1994 - 81 Abb. - 140 Seiten - ISBN 3-540-57284-8
- 66 Kummesteiner, G.: **3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme**
1994 - 62 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-57535-9
- 67 Kugelmann, F.: **Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 - 76 Abb. - 144 Seiten - ISBN 3-540-57549-9
- 68 Schwarz, H.: **Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 - 96 Abb. - 148 Seiten - ISBN 3-540-57577-4
- 69 Wiethen, U.: **Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen**
1994 - 70 Abb. - 142 Seiten - ISBN 3-540-57794-7
- 70 Seehuber, M.: **Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 - 72 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-57896-X
- 71 Amann, W.: **Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionssystemen**
1994 - 71 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-57924-9
- 72 Schöpf, M.: **Rechnergestütztes Projektförderungs- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 - 63 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58052-2
- 73 Welling, A.: **Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 - 66 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-580-0
- 74 Zetlmayer, H.: **Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinstserienproduktion**
1994 - 62 Abb. - 143 Seiten - ISBN 3-540-58134-0

- 75 Lindl, M.: Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 - 66 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58221-5
- 76 Zipper, B.: Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung
1994 - 64 Abb. - 147 Seiten - ISBN 3-540-58222-3
- 77 Raith, P.: Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung
1995 - 51 Abb. - 130 Seiten - ISBN 3-540-58223-1
- 78 Engel, A.: Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation
1994 - 69 Abb. - 160 Seiten - ISBN 3-540-58258-4
- 79 Zäh, M. F.: Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 - 95 Abb. - 186 Seiten - ISBN 3-540-58624-5
- 80 Zwanzger, N.: Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung
1995 - 65 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-58634-2
- 81 Romanow, P.: Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen
1995 - 66 Abb. - 151 Seiten - ISBN 3-540-58771-3
- 82 Kahlenberg, R.: Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen
1995 - 71 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-58772-1
- 83 Huber, A.: Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung
1995 - 87 Abb. - 152 Seiten - ISBN 3-540-58773-X
- 84 Birkel, G.: Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen
1995 - 64 Abb. - 137 Seiten - ISBN 3-540-58869-8
- 85 Simon, D.: Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement
1995 - 77 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-58942-2
- 86 Nedeljkovic-Groha, V.: Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen
1995 - 94 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-58953-8
- 87 Rockland, M.: Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen
1995 - 83 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-58999-6
- 88 Linner, St.: Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 - 67 Abb. - 168 Seiten - ISBN 3-540-59016-1
- 89 Eder, Th.: Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme
1995 - 62 Abb. - 150 Seiten - ISBN 3-540-59084-6
- 90 Deutschle, U.: Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen
1995 - 80 Abb. - 188 Seiten - ISBN 3-540-59337-3
- 91 Dieterle, A.: Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 - 68 Abb. - 146 Seiten - ISBN 3-540-60120-1
- 92 Hechl, Chr.: Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 - 73 Abb. - 158 Seiten - ISBN 3-540-60325-5
- 93 Albertz, F.: Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
1995 - 83 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-60608-8
- 94 Trunzer, W.: Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 - 101 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-60961-X
- 95 Fichtmüller, N.: Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 - 83 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-60960-1
- 96 Trucks, V.: Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 - 64 Abb. - 141 Seiten - ISBN 3-540-60599-8
- 97 Schäffer, G.: Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 - 71 Abb. - 170 Seiten - ISBN 3-540-60958-X
- 98 Koch, M. R.: Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 - 67 Abb. - 138 Seiten - ISBN 3-540-61104-5
- 99 Moctezuma de la Barrera, J. L.: Ein durchgängiges System zur Computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 - 99 Abb. - 175 Seiten - ISBN 3-540-61145-2
- 100 Geuer, A.: Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 - 84 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-61495-8
- 101 Ebner, C.: Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 - 67 Abb. - 132 Seiten - ISBN 3-540-61678-0
- 102 Pischelstrieder, K.: Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 - 74 Abb. - 171 Seiten - ISBN 3-540-61714-0
- 103 Köhler, R.: Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 - 62 Abb. - 177 Seiten - ISBN 3-540-62024-9
- 104 Feldmann, Ch.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 - 71 Abb. - 163 Seiten - ISBN 3-540-62059-1
- 105 Lehmann, H.: Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystemen
1997 - 96 Abb. - 191 Seiten - ISBN 3-540-62202-0
- 106 Wagner, M.: Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 - 94 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-62656-5
- 107 Lorenzen, J.: Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 - 63 Abb. - 129 Seiten - ISBN 3-540-62794-4
- 108 Krönert, U.: Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
1997 - 53 Abb. - 127 Seiten - ISBN 3-540-63338-3
- 109 Pfersdorf, I.: Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 - 74 Abb. - 172 Seiten - ISBN 3-540-63615-3
- 110 Kuba, R.: Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 - 77 Abb. - 155 Seiten - ISBN 3-540-63642-0
- 111 Kaiser, J.: Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 - 67 Abb. - 139 Seiten - ISBN 3-540-63999-3
- 112 Geyer, M.: Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 - 85 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-64195-5
- 113 Martin, C.: Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 - 73 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-64401-6
- 114 Löffler, Th.: Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 - 85 Abb. - 136 Seiten - ISBN 3-540-64511-X
- 115 Lindermaier, R.: Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 - 84 Abb. - 164 Seiten - ISBN 3-540-64686-8
- 116 Koehrer, J.: Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 - 75 Abb. - 185 Seiten - ISBN 3-540-65037-7
- 117 Schuller, R. W.: Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 - 76 Abb. - 162 Seiten - ISBN 3-540-65320-1
- 118 Debuschewitz, M.: Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 - 104 Abb. - 169 Seiten - ISBN 3-540-65350-3

- 119 Bauer, L.: Strategien zur rechnergestützten Offline- Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 - 98 Abb. - 145 Seiten - ISBN 3-540-65382-1
- 120 Pfoh, E.: Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 - 69 Abb. - 154 Seiten - ISBN 3-540-65525-5
- 121 Spitznagel, J.: Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 - 63 Abb. - 156 Seiten - ISBN 3-540-65896-3

Forschungsberichte IWB ab Band 122

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte IWB ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

- 122 *Burghard Schneider*: Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-559-9
- 123 *Bernold Goldstein*: Modellgestützte Geschäftsprozessgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-546-9
- 124 *Helmut E. Mößner*: Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten - ISBN 978-3-89675-585-8
- 125 *Ralf-Gunter Gräser*: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten - ISBN 978-3-89675-603-9
- 126 *Hans-Jürgen Trossin*: Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten - ISBN 978-3-89675-614-5
- 127 *Doris Kugelmann*: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten - ISBN 978-3-89675-615-2
- 128 *Rolf Diesch*: Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-618-3
- 129 *Werner E. Lulay*: Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten - ISBN 978-3-89675-620-6
- 130 *Otto Murr*: Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten - ISBN 978-3-89675-636-7
- 131 *Michael Macht*: Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten - ISBN 978-3-89675-638-1
- 132 *Bruno H. Mehler*: Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
152 Seiten - ISBN 978-3-89675-645-9
- 133 *Knut Heltmann*: Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten - ISBN 978-3-89675-675-6
- 134 *Stefan Blessing*: Gestaltung der Materialfußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten - ISBN 978-3-89675-690-9
- 135 *Can Abay*: Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten - ISBN 978-3-89675-697-8
- 136 *Stefan Brandner*: Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten - ISBN 978-3-89675-715-9
- 137 *Arnd G. Hirschberg*: Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten - ISBN 978-3-89675-729-6
- 138 *Alexandra Reek*: Strategien zur Fokusspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten - ISBN 978-3-89675-730-2
- 139 *Khalid-Alexander Sabbah*: Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten - ISBN 978-3-89675-739-5
- 140 *Klaus U. Schilffebacher*: Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten - ISBN 978-3-89675-754-8
- 141 *Andreas Sprengel*: Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten - ISBN 978-3-89675-757-9
- 142 *Andreas Gallasch*: Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten - ISBN 978-3-89675-781-4
- 143 *Ralf Cuiper*: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten - ISBN 978-3-89675-783-8
- 144 *Christian Schneider*: Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten - ISBN 978-3-89675-789-0
- 145 *Christian Jonas*: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten - ISBN 978-3-89675-870-5
- 146 *Ulrich Willnecker*: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten - ISBN 978-3-89675-891-0
- 147 *Christof Lehner*: Beschreibung des Nd:YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten - ISBN 978-3-8316-0004-5
- 148 *Frank Rick*: Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten - ISBN 978-3-8316-0008-3
- 149 *Michael Höhn*: Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0012-0

- 150 **Jörn Böhl:** Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0020-5
- 151 **Robert Bürgel:** Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten - ISBN 978-3-8316-0021-2
- 152 **Stephan Dürrschmidt:** Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0023-6
- 153 **Bernhard Eich:** Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
136 Seiten - ISBN 978-3-8316-0028-1
- 154 **Wolfgang Rudarfer:** Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten - ISBN 978-3-8316-0037-3
- 155 **Hans Meier:** Verteilte kooperative Steuerung maschinenaher Abläufe
166 Seiten - ISBN 978-3-8316-0044-1
- 156 **Gerhard Nowak:** Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0055-7
- 157 **Martin Werner:** Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten - ISBN 978-3-8316-0058-8
- 158 **Bernhard Lenz:** Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten - ISBN 978-3-8316-0094-6
- 159 **Stefan Grunwald:** Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0095-3
- 160 **Josef Gartner:** Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten - ISBN 978-3-8316-0096-0
- 161 **Wolfgang Zeller:** Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0100-4
- 162 **Michael Loferer:** Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten - ISBN 978-3-8316-0118-9
- 163 **Jörg Führer:** Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0124-0
- 164 **Jürgen Höppner:** Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0125-7
- 165 **Hubert Götte:** Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten - ISBN 978-3-8316-0126-4
- 166 **Martin Weissenberger:** Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0138-7
- 167 **Dirk Jacob:** Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0142-4
- 168 **Ulrich Raßgoderer:** System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten - ISBN 978-3-8316-0154-7
- 169 **Robert Klingel:** Anziehfverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten - ISBN 978-3-8316-0174-5
- 170 **Paul Jens Peter Ross:** Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten - ISBN 978-3-8316-0191-2
- 171 **Stefan von Praun:** Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0202-5
- 172 **Florian von der Hagen:** Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-0208-7
- 173 **Oliver Kramer:** Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-0211-7
- 174 **Winfried Dohmen:** Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0214-8
- 175 **Oliver Anton:** Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-0215-5
- 176 **Welf Broser:** Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0217-9
- 177 **Frank Breitinge:** Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten - ISBN 978-3-8316-0227-8
- 178 **Johann von Pieveling:** Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten - ISBN 978-3-8316-0230-8
- 179 **Thomas Baudisch:** Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0249-0
- 180 **Heinrich Schieferstein:** Experimentelle Analyse des menschlichen Kaustems
132 Seiten - ISBN 978-3-8316-0251-3
- 181 **Joachim Berlak:** Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0258-2
- 182 **Christian Meierloh:** Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten - ISBN 978-3-8316-0292-6
- 183 **Volker Weber:** Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0330-5
- 184 **Thomas Bongardt:** Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten - ISBN 978-3-8316-0332-9
- 185 **Tim Angerer:** Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0336-7
- 186 **Alexander Krüger:** Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten - ISBN 978-3-8316-0371-8
- 187 **Matthias Meindl:** Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten - ISBN 978-3-8316-0465-4
- 188 **Thomas Fusch:** Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-0467-8
- 189 **Thomas Mosandl:** Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-0471-5
- 190 **Christian Patron:** Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0474-6
- 191 **Robert Cisek:** Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0475-3

- 192 **Florian Auer:** Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten - ISBN 978-3-8316-0485-2
- 193 **Carsten Selke:** Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten - ISBN 978-3-8316-0495-1
- 194 **Markus Seefried:** Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-0503-3
- 195 **Wolfgang Wagner:** Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0586-6
- 196 **Christopher Ulrich:** Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0590-3
- 197 **Johann Härtl:** Prozessgasfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten - ISBN 978-3-8316-0611-5
- 198 **Bernd Hartmann:** Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-0615-3
- 199 **Michael Schilp:** Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0631-3
- 200 **Florian Manfred Grätz:** Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0643-6
- 201 **Dieter Eireiner:** Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-0650-4
- 202 **Gerhard Volkwein:** Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 **Sven Roeren:** Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 **Henning Rudolf:** Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 **Stella Clarke-Griebisch:** Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 **Michael Ehrenstraßer:** Sensoreinsatz in der telepräsen- ten Mikromontage
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0743-3
- 207 **Rainer Schack:** Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 **Wolfgang Sudhoff:** Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 **Stefan Müller:** Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 **Ulrich Kohler:** Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 **Klaus Schlicknieder:** Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 **Niklas Müller:** Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 **Daniel Siedl:** Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrenbewegungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 **Dirk Ansorge:** Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 **Georg Würnsch:** Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 **Thomas Oertli:** Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 **Bernd Petzold:** Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsen- te Mikromontage
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 **Lucas Papadakis:** Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten - ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 **Mathias Mörtl:** Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 **Sebastian Weig:** Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 **Tobias Hornfeck:** Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten - ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 **Hans Egermeier:** Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 **Matthäus Sigi:** Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlstahns
200 Seiten - ISBN 978-3-8316-0841-6
- 224 **Mark Harfensteller:** Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-0849-2
- 225 **Jochen Werner:** Methode zur roboterbasieren förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 **Florian Hagemann:** Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 **Haitham Rashidy:** Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 **Wolfgang Vogl:** Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten - ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 **Sonja Schedl:** Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 **Andreas Trautmann:** Bifocal Hybrid Laser Welding - A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten - ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 **Patrick Neise:** Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 **Christian Habicht:** Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in unterbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 **Michael Spitzweg:** Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0931-4

- 234 **Ulrich Munzert:** Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten - ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 **Georg Völlner:** Rührreißschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-0955-0
- 236 **Nils Müller:** Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-0992-5
- 237 **Franz Decker:** Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten - ISBN 978-3-8316-0996-3
- 238 **Christian Lau:** Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4012-6
- 239 **Christoph Rimpau:** Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten - ISBN 978-3-8316-4015-7
- 240 **Michael Loy:** Modulare Vibrationswendelförderer für flexiblen Teilezuführung
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4027-0
- 241 **Andreas Eursch:** Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten - ISBN 978-3-8316-4029-4
- 242 **Florian Schwarz:** Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4030-0
- 243 **Martin Georg Prasch:** Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten - ISBN 978-3-8316-4033-1
- 244 **Johannes Schilp:** Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4063-8
- 245 **Stefan Lutzmann:** Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4070-6
- 246 **Gregor Branner:** Modellierung transientser Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4071-3
- 247 **Josef Ludwig Zimmermann:** Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten - ISBN 978-3-8316-4091-1
- 248 **Clemens Pörnbacher:** Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten - ISBN 978-3-8316-4108-6
- 249 **Alexander Lindworsky:** Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten - ISBN 978-3-8316-4125-3
- 250 **Michael Mauderer:** Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4126-0
- 251 **Roland Mark:** Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4127-7
- 252 **Florian Reichl:** Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4128-4
- 253 **Paul Gebhard:** Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreißschweißen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4129-1
- 254 **Michael Heinz:** Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten - ISBN 978-3-8316-4147-5
- 255 **Pascal Krebs:** Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten - ISBN 978-3-8316-4156-7
- 256 **Gerhard Straßer:** Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten - ISBN 978-3-8316-4161-1
- 257 **Frédéric-Felix Lacour:** Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflusintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4162-8
- 258 **Thomas Hensel:** Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten - ISBN 978-3-8316-4167-3
- 259 **Sherif Zaidan:** A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten - ISBN 978-3-8316-4175-8
- 260 **Hendrik Schellmann:** Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4189-5
- 261 **Marwan Rad:** Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten - ISBN 978-3-8316-4195-6
- 262 **Markus Ruhstorfer:** Rührreißschweißen von Rohren
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4197-0
- 263 **Rüdiger Daub:** Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmelitungsschweißen von Stählen
182 Seiten - ISBN 978-3-8316-4199-4
- 264 **Michael Ott:** Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4201-4
- 265 **Martin Ostgathe:** System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten - ISBN 978-3-8316-4206-9
- 266 **Imke Nora Kellner:** Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4223-6
- 267 **Florian Oefele:** Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten - ISBN 978-3-8316-4224-3
- 268 **Claudia Anna Ehinger:** Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4233-5
- 269 **Tobias Zeilinger:** Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4234-2
- 270 **Stefan Krug:** Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten - ISBN 978-3-8316-4243-4
- 271 **Marc Lotz:** Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reißschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4245-8
- 272 **William Brice Tekouo Mouthicho:** A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4247-2
- 273 **Matthias Waibel:** Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten - ISBN 978-3-8316-4250-2
- 274 **Christian Eschey:** Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten - ISBN 978-3-8316-4270-0
- 275 **Florian Aull:** Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten - ISBN 978-3-8316-4283-0
- 276 **Marcus Hennauer:** Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4306-6

- 277 **Alexander Götzfried:** Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4310-3
- 278 **Saskia Reinhardt:** Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4317-2
- 279 **Fabian J. Meling:** Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4319-6
- 280 **Jörg Egbers:** Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten - ISBN 978-3-8316-4328-8
- 281 **Max von Bredow:** Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
204 Seiten - ISBN 978-3-8316-4337-0
- 282 **Tobias Philipp:** RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten - ISBN 978-3-8316-4346-2
- 283 **Stefan Rainer Johann Braunreuther:** Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten - ISBN 978-3-8316-4348-6
- 284 **Johannes Pohl:** Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4358-5
- 285 **Mathy Wiesbeck:** Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4368-1
- 286 **Sonja Huber:** In-situ-Legierungsbestimmung beim Laserstrahlschweißen
206 Seiten - ISBN 978-3-8316-4370-7
- 287 **Robert Wiedenmann:** Prozessmodell und Systemtechnik für das laserunterstützte Fräsen
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4384-4
- 288 **Thomas Irenhauser:** Bewertung der Wirtschaftlichkeit von RFID im Wertschöpfungsnetz
242 Seiten - ISBN 978-3-8316-4404-9
- 289 **Jens Hatwig:** Automatisierte Bahnplanung für Industrieroboter und Scanneroptiken bei der Remote-Laserstrahlbearbeitung
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4405-6
- 290 **Matthias Baur:** Aktives Dämpfungssystem zur Ratterunterdrückung an spanenden Werkzeugmaschinen
210 Seiten - ISBN 978-3-8316-4408-7
- 291 **Alexander Schober:** Eine Methode zur Wärmequellenkalibrierung in der Schweißstruktursimulation
198 Seiten - ISBN 978-3-8316-4415-5
- 292 **Matthias Glonegger:** Berücksichtigung menschlicher Leistungsschwankungen bei der Planung von Variantenfließmontagesystemen
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4419-3
- 293 **Markus Kahmert:** Scanstrategien zur verbesserten Prozessführung beim Elektronenstrahlschmelzen (EBM)
228 Seiten - ISBN 978-3-8316-4416-2
- 294 **Sebastian Schindler:** Strategische Planung von Technologieketten für die Produktion
220 Seiten - ISBN 978-3-8316-4434-6
- 295 **Tobias Föckerer:** Methode zur rechnergestützten Prozessgestaltung des Schleifhärtens
128 Seiten - ISBN 978-3-8316-4448-3
- 296 **Rüdiger Spillner:** Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion
286 Seiten - ISBN 978-3-8316-4450-6
- 297 **Daniel Schmid:** Rührreibschweißen von Aluminiumlegierungen mit Stählen für die Automobilindustrie
300 Seiten - ISBN 978-3-8316-4452-0
- 298 **Florian Karl:** Bedarfsermittlung und Planung von Rekonfigurationen an Betriebsmitteln
222 Seiten - ISBN 978-3-8316-4458-2
- 299 **Philipp Ronald Engelhardt:** System für die RFID-gestützte situationsbasierte Produktionssteuerung in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
246 Seiten - ISBN 978-3-8316-4472-8
- 300 **Markus Graßl:** Bewertung der Energieflexibilität in der Produktion
202 Seiten - ISBN 978-3-8316-4476-6
- 301 **Thomas Kirchmeier:** Methode zur Anwendung der berührungslosen Handhabung mittels Ultraschall im automatisierten Montageprozess
196 Seiten - ISBN 978-3-8316-4478-0
- 302 **Oliver Rösch:** Steigerung der Arbeitsgenauigkeit bei der Fräsbearbeitung metallischer Werkstoffe mit Industrierobotern
214 Seiten - ISBN 978-3-8316-4486-5
- 303 **Christoph Sieben:** Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität von Kolbendichtungen
194 Seiten - ISBN 978-3-8316-4510-7
- 304 **Philipp Alexander Schmidt:** Laserstrahlschweißen elektrischer Kontakte von Lithium-Ionen-Batterien in Elektro- und Hybridfahrzeugen
190 Seiten - ISBN 978-3-8316-4519-0
- 305 **Yi Shen:** System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage
230 Seiten - ISBN 978-3-8316-4520-6
- 306 **Thomas Bonin:** Moderne Ordnungsreduktionsverfahren für die Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen
274 Seiten - ISBN 978-3-8316-4522-0
- 307 **Jan Daniel Musial:** Remote-Laserstrahl-Abtragschneiden
168 Seiten - ISBN 978-3-8316-4523-7
- 308 **Emin Genc:** Frühwarnsystem für ein adaptives Störungsmanagement
234 Seiten - ISBN 978-3-8316-4525-1
- 309 **Mirko Langhorst:** Beherrschung von Schweißverzug und Schweißeigenspannungen
252 Seiten - ISBN 978-3-8316-4524-2
- 310 **Markus Schweier:** Simulative und experimentelle Untersuchungen zum Laserschweißen mit Strahloszillation
282 Seiten - ISBN 978-3-8316-4536-7
- 311 **Florian Geiger:** System zur wissensbasierten Maschinenbelegungsplanung auf Basis produktspezifischer Auftragsdaten
224 Seiten - ISBN 978-3-8316-4537-4

