

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

**Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik
am Beispiel der Automobilindustrie**

Henning Rudolf

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. G. Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Deuse, Universität Dortmund

Die Dissertation wurde am 13.09.2006 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14.12.2006 ange-
nommen.

Henning Rudolf

**Wissensbasierte Montageplanung
in der Digitalen Fabrik
am Beispiel der Automobilindustrie**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 204

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2006

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.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 Daten-
verarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugs-
weiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2007

ISBN 978-3-8316-0697-9

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utz.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 am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Deuse, dem Leiter des Lehrstuhls für Arbeits- und Produktionssysteme der Universität Dortmund, 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 bei allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Dabei möchte ich besonders meinen früheren Diplomanden und heutigen Institutskollegen Herrn Markus Wiedemann hervorheben, dessen Arbeiten einen maßgeblichen Beitrag leisteten. Für die fachlichen Diskussionen und die kritische Durchsicht meiner Arbeit möchte ich insbesondere Herrn Niklas Möller und Herrn Stefan Müller danken.

Die Hinweise von Herrn Uwe Wagner von der camos Software und Beratung GmbH sowie von Herrn Dr. Christian Patron und Herrn Martin Mewe von der BMW AG haben mir sehr geholfen, stets den Bezug zur industriellen Praxis herzustellen.

Besonderer Dank gilt meiner Familie, die mir meine Ausbildung ermöglicht und mich in meinem Tun stets unterstützt hat. Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Frau Nina, die mit der sorgfältigen germanistischen Durchsicht meiner Arbeit einen großen Teil zum Gelingen beigetragen hat.

München, im Februar 2007

Henning Rudolf

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Tabellenverzeichnis.....	XI
Abkürzungsverzeichnis.....	XII
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
1.1 Ausgangssituation.....	1
1.2 Zielsetzung und Fokus der Arbeit	7
1.3 Vorgehensweise.....	9
2 Begriffsdefinitionen und Grundlagen	11
2.1 Allgemeines	11
2.2 Die Produktentstehung in der Automobilindustrie.....	11
2.3 Variantenmanagement.....	12
2.4 Montageplanung als Teilbereich der Prozessplanung	16
2.4.1 Allgemeines	16
2.4.2 Planungsmethoden.....	17
2.4.3 Stückliste und Arbeitsplan als zentrale Dokumente.....	20
2.4.3.1 Allgemeines.....	20
2.4.3.2 Stückliste.....	20
2.4.3.3 Arbeitsplan	23
2.5 Informationstechnische Systeme im Produktentstehungsprozess	26
2.5.1 Allgemeines	26

2.5.2	Product Lifecycle Management.....	27
2.5.3	Virtuelle Produktion und Digitale Fabrik.....	30
2.5.4	Computer Aided Process Planning.....	33
2.6	Wissensbasierte Systeme.....	37
2.6.1	Allgemeines.....	37
2.6.2	Repräsentationsformen zur Abbildung von Wissen.....	40
2.6.2.1	Allgemeines.....	40
2.6.2.2	Regelbasierte Wissensrepräsentation.....	40
2.6.2.3	Objektorientierte Wissensrepräsentation.....	43
2.6.2.4	Constraintbasierte Wissensrepräsentation.....	45
3	Stand der Forschung und Technik.....	47
3.1	Allgemeines.....	47
3.2	Einsatz wissensbasierter Methoden in Systemen der Produkt- und Prozessplanung.....	48
3.2.1	Allgemeines.....	48
3.2.2	PLM-Systeme.....	51
3.2.3	CAPP-Systeme.....	53
3.3	Die Digitale Fabrik in der Montageplanung.....	54
3.3.1	Allgemeines.....	54
3.3.2	Grundlegende Methode und universitäre Prototypen.....	55
3.3.3	Umsetzung in kommerziellen Systemen.....	57
3.3.3.1	Allgemeines.....	57
3.3.3.2	Datenmodell der Basisklassen.....	60

3.3.3.3	Überblick über das gesamte Klassenkonzept.....	65
3.3.3.4	Automatisierung der Planung.....	68
3.3.3.5	Schnittstellen.....	70
3.3.4	Erweiterungen kommerzieller Systeme.....	71
3.3.4.1	Allgemeines.....	71
3.3.4.2	Features.....	72
3.3.4.3	Einbindung von Planungssystemen.....	75
3.3.4.4	Varianten.....	77
3.4	Ableitung von Handlungsfeldern.....	79
4	Anforderungen an die wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik.....	85
4.1	Allgemeines.....	85
4.2	Wissensrepräsentation in der Montageplanung.....	87
4.3	Systemtechnische Umsetzbarkeit der Methode.....	90
5	Grobkonzept für die wissensbasierte Montageplanung.....	91
5.1	Allgemeines.....	91
5.2	Wissensrepräsentation in kommerziellen Systemen der Digitalen Fabrik.....	93
5.3	Wissensbasierte Montageplanung.....	100
5.3.1	Allgemeines.....	100
5.3.2	Erzeugung von Strukturbeziehungen und Reihenfolgen.....	101
5.3.3	Sicherstellung der objektübergreifenden Konsistenz.....	103
5.4	Werkzeugauswahl.....	105
5.5	Allgemeines Integrationskonzept.....	108

5.6 Fazit	109
6 Feinkonzept und dessen Umsetzung	111
6.1 Allgemeines	111
6.2 Auswahl des Werkzeuges	111
6.3 Integrationskonzept	115
6.3.1 Auswahl des Konzeptes	115
6.3.2 Vorbereitung der Integration	118
6.3.2.1 Allgemeines	118
6.3.2.2 Analyse der XML-Strukturen des Systems eM-Planner®	119
6.3.2.3 Analyse der XML-Strukturen des Systems camos.Develop®	123
6.3.3 Durchführung der Integration	127
6.3.3.1 Allgemeines	127
6.3.3.2 Erzeugung der erforderlichen Schemata im Editor .	127
6.3.3.3 Zuordnung der Informationen im Mapper	128
6.4 Wissensverarbeitung	130
6.4.1 Allgemeines	130
6.4.2 Verarbeitung des Planungswissens	136
6.4.2.1 Allgemeines	136
6.4.2.2 Import der Klassenstruktur und der Merkmals- ausprägungen aus den beiden Zielschemata	136
6.4.2.3 Erzeugung der variantenspezifischen Produkt-, Prozess- und Ressourcenstruktur	138

6.4.3	Erstellung der Benutzeroberfläche	139
6.5	Realisierung des Systems GenPlanner	139
6.6	Fallstudie	141
6.6.1	Allgemeines	141
6.6.2	Realisierung der Standardplanungsfunktionen mit dem wissensbasierten System.....	142
6.6.3	Realisierung erweiterter Funktionalitäten	143
6.7	Nutzenbewertung.....	147
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	151
8	Literaturverzeichnis.....	155
9	Anhang	177
9.1	Genannte Firmen	177
9.2	Unified Modeling Language (UML).....	181
9.3	Entity Relationship Diagram (ERD)	182
9.4	Extensible Markup Language (XML)	183
9.5	Genutzte Softwareprodukte	184

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Produktmodelle der BMW Group (nach EDER 2005).....	1
Abbildung 2:	Erfolgsfaktoren für die Produkt- und Prozessentwicklung (nach EDER 2005).....	2
Abbildung 3:	Verkürzung der Entwicklungszeit (nach DROBIR 2005).....	3
Abbildung 4:	Informations- und Kommunikationstechnik im Produktent- stehungsprozess (nach KLAUKE 2002).....	4
Abbildung 5:	Ziele der Digitalen Fabrik in unterschiedlichen Branchen (nach KLAUKE 2002).....	6
Abbildung 6:	Aufbau der Arbeit.....	9
Abbildung 7:	Klassifizierung der Varianten (nach LINGNAU 1994)	13
Abbildung 8:	Einordnung der Arbeitsvorbereitung (nach AWF 1968).....	17
Abbildung 9:	Systematik der Montageplanung (nach BULLINGER 1986).....	18
Abbildung 10:	Aufgaben der Ablauf- und Systemplanung in der Serien- fertigung (nach THALER 1993).....	19
Abbildung 11:	Stufen der Planungsebenen am Beispiel der Montage einer Werkzeugmaschine (nach AMMER 1985)	20
Abbildung 12:	Struktur einer Baukastenstückliste (nach KOHLHOFF 2005).....	22
Abbildung 13:	Zusammenhang zwischen Arbeitsplan und Stückliste nach GÜNTNER et al. 2006a)	23
Abbildung 14:	Methoden der Arbeitsplanung (nach EVERSHEIM & STEUDEL 1977).....	24
Abbildung 15:	Informationstechnische Systeme im Produktentstehungs- prozess zur Unterstützung einer durchgängigen Planung von Produkten, Prozessen und Ressourcen (nach KOHLHOFF 2005).....	26
Abbildung 16:	PLM-Anwendungsmodule (nach SCHÖTTNER 1999).....	28
Abbildung 17:	Werkzeuge der Digitalen Fabrik (nach BLEY et al. 2004)	31

Abbildung 18: Systemlandschaft der Digitalen Fabrik (nach WIESMÜLLER 2002).....	32
Abbildung 19: Ziele der Einführung eines Arbeitsplanungssystems (nach HAMELMANN 1995).....	33
Abbildung 20: Ergebnisse einer Studie der Universität Hannover zu EDV-Systemen in der Arbeitsplanung, an der 75 deutsche Unternehmen aus den Bereichen Automobilbau sowie Maschinen- und Anlagenbau teilgenommen haben (nach DRABOW & WOELK 2004).....	36
Abbildung 21: Formen der Wissensrepräsentation (eigene Darstellung in Anlehnung an HAMELMANN 1995)	37
Abbildung 22: Beispiel einer Entscheidungstabelle (eigene Darstellung in Anlehnung an DIN 66241 1979 und THALER 1993)	42
Abbildung 23: Beispiel einer Taxonomie (nach HAMELMANN 1995).....	43
Abbildung 24: Beispiel einer Partonomie (nach REFA 1992)	44
Abbildung 25: Zusammenhang der Variablen bei Regeln und Constraints (eigene Darstellung in Anlehnung an GÖRZ 1995)	45
Abbildung 26: Aufgabentypen und Unterstützung durch wissensbasierte Systeme (nach HINKELMANN 1995).....	49
Abbildung 27: Definition des Konfigurierens (nach GÜNTER et al. 1999)	50
Abbildung 28: Anwendung von Entscheidungstabellen in PLM-Systemen (eigene Darstellung in Anlehnung an SCHÖTTNER 1999)	52
Abbildung 29: Die Fünf-Schichten-Methode der Montageplanung (nach FELDMANN 1997).....	56
Abbildung 30: Gegenüberstellung sequentieller und paralleler Vorgehensweisen bei Konstruktion und Montageplanung (nach JONAS 2000).....	59
Abbildung 31: Die verknüpfte Information der Basisklassen als Bezugsstruktur zur Abbildung des Datenmodells (nach KLAUKE 2002)	61

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 32: Klasse PRODUKT mit zugeordnetem Konstruktions- und Planungsprodukt (nach JONAS 2000)	62
Abbildung 33: Gegenüberstellung der hierarchischen Produkt- und Prozessstruktur nach Gliederungsebenen (nach JONAS 2000) ..	63
Abbildung 34: Klasse PROZESS mit der Zuordnung zur Klasse PLANUNGS-PRODUKT über die Klasse MONTAGE-POSITION (nach JONAS 2000)	64
Abbildung 35: Klasse RESSOURCE in Assoziation mit der Klasse PROZESS mit Anbindung an Fabrikplanung bzw. Fertigungsmittelkonstruktion (nach JONAS 2000).....	65
Abbildung 36: Grobstruktur der Klassen des Referenzmodells der „Offenen Virtuellen Fabrik“ als Grundlage des kommerziellen Systems DELMIA Process Engineer® (nach KLAUKE 2002).....	66
Abbildung 37: Stammmodell mit generationsübergreifender Nutzung am Beispiel von Fahrzeugmodellen der Volkswagen AG (nach MACKE 2006)	70
Abbildung 38: Datenstruktur des Prozessplans als Entity Relationship Diagram (nach FRANKE 2003)	73
Abbildung 39: Um ASSEMBLY FEATURES erweiterte Datenstruktur des Systems DELMIA Process Engineer® (nach FRANKE 2003)....	74
Abbildung 40: Produkt-Prozess-Relation mit Variantenkonzept (nach BLEY et al. 2005)	78
Abbildung 41: Planungsmethoden der Digitalen Fabrik	86
Abbildung 42: Zuordnung von Problemlösungstypen zu Grundtechniken der Wissensrepräsentation und -verarbeitung (nach PUPPE 1991) ..	87
Abbildung 43: Gesamtkonzept zur Umsetzung einer wissensbasierten Montageplanung	92
Abbildung 44: Partonomie in der Digitalen Fabrik am Beispiel des eM-Planner®	94

Abbildung 45: Ermittlung einer variantenspezifischen Baugruppe mit Hilfe von Variantencodes	95
Abbildung 46: Definition eines Variantensatzes im Variantensatzeditor am Beispiel des eM-Planner®	96
Abbildung 47: Variantenbehaftete Produkt-, Prozess- und Ressourcenstruktur am Beispiel des eM-Planner®	97
Abbildung 48: Netzplanansicht für ein einfaches Planungsszenario am Beispiel des eM-Planner®	98
Abbildung 49: Prozesse der Station Montieren bei unterschiedlichen Produktvarianten am Beispiel des eM-Planner®	99
Abbildung 50: Hauptfunktionen kommerzieller Systeme der Digitalen Fabrik am Beispiel des eM-Planner®	100
Abbildung 51: Ermittlung einer variantenspezifischen Baugruppe mit Hilfe einer Regelauswertung in einem wissensbasierten System.....	102
Abbildung 52: Aggregation innerhalb eines Produktmodells (nach BENDER 2005).....	104
Abbildung 53: Wurzelkonzept für eine PC-Konfiguration am Beispiel von ENGCON® (nach RUNTE 2006)	113
Abbildung 54: Konzept einer Datentransformation vom em-Planner® in das wissensbasierte System camos.Develop® unter Zuhilfenahme des Microsoft BizTalk Server®	118
Abbildung 55: Projektauszug aus dem System eM-Planner® in Form eines XML-Dokumentes	119
Abbildung 56: Verknüpfung Prozess mit Bauteilen/Baugruppen im eM-Planner®	121
Abbildung 57: Verknüpfung Prozess mit Ressourcen im eM-Planner®	123
Abbildung 58: Klassen- und Strukturbaum in camos.Develop®	125
Abbildung 59: Beispiel einer Klasse als XML-Struktur in camos.Develop® ..	126
Abbildung 60: Zuordnung der Daten im Microsoft BizTalk Server®-Mapper	129

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 61: Objektübergreifende Zeitberechnung in der Digitalen Fabrik am Beispiel des DELMIA Process Engineer® (eigene Darstellung in Anlehnung an KLAUKE 2002)	133
Abbildung 62: Objektübergreifende Zeitberechnung in einem spezifischen wissensbasierten System	134
Abbildung 63: Einmaliger Aufruf von Summierungen in camos.Develop® ...	135
Abbildung 64: Klassenbaum von Planungssystem und Datenbasis in camos.Develop®	137
Abbildung 65: Strukturbaum des Prozesses Sicht- und Funktionsprüfung in camos.Develop®	138
Abbildung 66: Strukturbaum der Klasse PRODUKT im selbst entwickelten System GenPlanner	140
Abbildung 67: Methode ppStrukturAnlegen im selbst entwickelten System GenPlanner	141
Abbildung 68: Anwendungsbeispiel einer Montageplanung im eM-Planner®	142
Abbildung 69: Regelbasierte Zuordnung von unterschiedlichen Prozesszeiten zu einem Prozesselement im GenPlanner	144
Abbildung 70: Prinzip der Maximalstruktur einer Prozessfolge	145
Abbildung 71: Regelbasierte Baukastenstruktur zur Abbildung einer variantenspezifischen Prozessfolge im GenPlanner	146
Abbildung 72: Beispielhafte Abbildung von Klassen in der Unified Modeling Language	181
Abbildung 73: Beispiel eines Entity Relationship Diagram	182
Abbildung 74: Beispiel einer XML-Datei	183

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Stand der Forschung in der Montageplanung.....	83
Tabelle 2:	Kriterien zur Auswahl einer universellen Entwicklungs- umgebung	107
Tabelle 3:	Gegenüberstellung wissensbasierter Entwicklungssysteme....	115
Tabelle 4:	Übersicht der Initiativen und Standards in der Fabrikplanung (nach CONSTANTINESCU et al. 2006).....	116

Abkürzungsverzeichnis

AP	Application Protocol (Anwendungsprotokol)
AWF	Ausschuss für wirtschaftliche Fertigung e.V.
BMW	Bayerische Motoren Werke AG
CAD	Computer Aided Design (Computergestütztes Konstruieren)
CAE	Computer Aided Engineering (Computergestützte Entwicklung)
CAFD	Computer Aided Factory Design (Computergestützte Fabrikplanung)
CAPP	Computer Aided Process Planning (Computergestützte Prozessplanung)
CAM	Computer Aided Manufacturing (Computergestützte Fertigung)
CORBA	Common Object Request Broker Architecture (Objektorientierte Middleware)
CRM	Customer Relationship Management (Kundenbeziehungsmanagement)
CSV	Comma Separated Values (Kommagetrennte Werte)
DES	Discrete Event Simulation (Ablaufsimulation)
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsche Industrienorm
DMU	Digital Mock-up (Digitales Versuchsmodell)
EAI	Enterprise Application Integration (Unternehmensanwendungsintegration)
ENGDAT	Engineering Data Message (Industriestandard für den Austausch von CAD-Dateien)
ERD	Entity Relationship Diagram (Objektbeziehungsdiagramm)

ERP	Enterprise Resource Planning (Planung der Unternehmensressourcen)
FM	Fertigungsmittel
ID	Identifikator auch Kennung oder Identifikationsnummer
iPPE	Integriertes Produkt- und Prozess-Engineering
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnik
iViP	Integrierte Virtuelle Produktentstehung
J2EE	Java 2 Plattform, Enterprise Edition (Java 2 Plattform, Unternehmensausgabe)
J2ME	Java 2 Plattform, Micro Edition (Java 2 Plattform, Kleinstausgabe)
J2SE	Java 2 Plattform, Standard Edition (Java 2 Plattform, Standardausgabe)
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
OASIS	Organization for the Advancement of Structured Information Standards (Internationale Organisation, die sich mit der Entwicklung von E-Business- und Web Service-Standards beschäftigt.)
OMG	Object Management Group (Konsortium, das sich mit der Entwicklung von herstellerunabhängigen Standards für die systemübergreifende, objektorientierte Programmierung beschäftigt.)
PDM	Produktdatenmanagement
PEP	Produktentstehungsprozess
PERT	Programmevaluierungs- und Rückblicktechnik
PLM	Product Lifecycle Management (Produktlebenszyklusmanagement)
PPS	Produktionsplanung und -steuerung

Abkürzungsverzeichnis

REFA	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
SAP	Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung
SCM	Supply Chain Management (Lieferkettenmanagement)
SOAP	Simple Object Access Protocol (Einfaches Objektzugriffsprotokoll)
SOP	Start of Production (Beginn der Serienproduktion)
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data (Standard zur Beschreibung von Produktmodelldaten)
UDDI	Universal Description, Discovery and Integration (Verzeichnisdienst, der die zentrale Rolle in einem Umfeld von dynamischen Web Services spielen soll.)
UML	Unified Modeling Language (Standardisierte Sprache für die Modellierung von Software und anderen Systemen)
VBA	Visual Basic for Applications (von Microsoft entwickelte Skriptsprache, die zur Steuerung von Programmabläufen in den Microsoft Office-Programmen dient)
VDA	Verband der Automobilindustrie e. V.
VDAFS	Verband der Automobilindustrie - Flächenschnittstelle
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
W3C	World Wide Web Consortium (Gremium zur Standardisierung des World Wide Web)
WSDL	Web Services Description Language (Plattform-, programmiersprachen- und protokollunabhängige XML-Spezifikation zur Beschreibung von Netzwerkdiensten (Web Services))
XMI	XML-Metadata Interchange (Standard der OMG, der als Austauschformat zwischen Entwicklungswerkzeugen genutzt wird.)
XML	Extensible Markup Language (Erweiterbare Auszeichnungssprache)

XSLT Extensible Style Language Transformation (Familie von Sprachen zur Erzeugung von Layouts für XML-Dokumente)

1 Einleitung und Zielsetzung

1.1 Ausgangssituation

„Indem wir Basiskomponenten im Sinne eines Baukastens in verschiedenen Fahrzeugen einsetzen, erschließen wir Synergieeffekte und verbessern so die Entwicklungsgeschwindigkeit, den Kostenaufwand und die Qualität neuer Fahrzeugprojekte“ (GÖSCHEL 2006, S. 139, Vorstand der BMW Group für Einkauf und Entwicklung). Ähnlich definiert EDER (2005) die Ansprüche an komplexe Premiumprodukte: Modernität, hohe Qualität, gutes Kosten-Nutzen-Verhältnis und Individualität. Besonders in den letzten Jahren hat die Individualität als Erfolgsfaktor erheblich an Bedeutung gewonnen (EDER 2005, ALDERS 2006), was sich auch in der Modellpalette der führenden Automobilhersteller widerspiegelt (siehe Abbildung 1). Viele Serienfertiger streben nach einer immer größeren Produktindividualisierung, um so einen zusätzlichen Kundennutzen zu erzielen, der sie von ihren Wettbewerbern differenziert (ZUBER et al. 2001, BURR et al. 2003, ZÄH et al. 2006). Durch diesen Zusatznutzen ist es möglich, einen strategischen Marktvorteil zu erzielen, der zu einer höheren Zahlungsbereitschaft beim Kunden oder zu einer Erhöhung des Marktanteils durch Verdrängung der Wettbewerber führt (PORTER 1980).

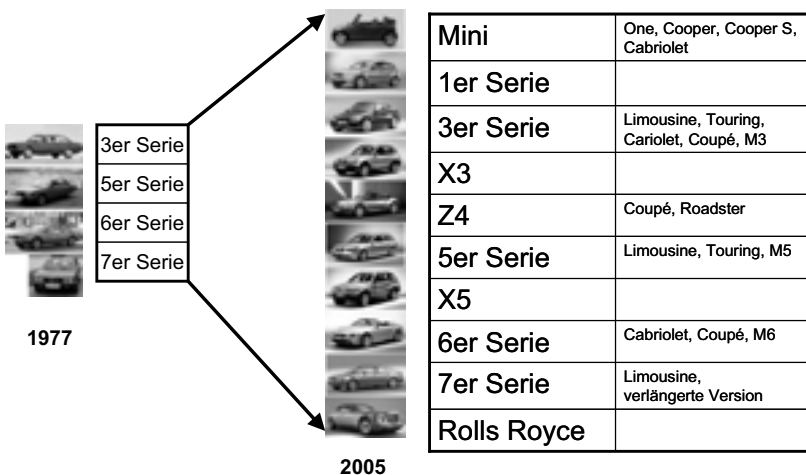


Abbildung 1: Produktmodelle der BMW Group (nach EDER 2005)

Das Ziel des höheren Individualisierungsgrades und der damit einhergehenden größeren Produktdifferenzierung steigert allerdings auch erheblich die Produktkomplexität. Die klassischen Erfolgsfaktoren Zeit, Kosten und Qualität sind demnach um die Beherrschung von Varianten zu erweitern (siehe Abbildung 2). Varianten bezeichnen nach DIN 199 (2002, S. 15) „Gegenstände ähnlicher Form und/oder Funktionen mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile“. Aufbauend hierauf definiert WIENDAHL (2004, S. 7) die Variantenvielfalt wie folgt: „Variantenvielfalt ist gekennzeichnet durch die Anzahl unterschiedlicher Ausführungsformen eines Teils, einer Baugruppe oder eines Produktes.“ Zusätzlich zu den Produktvarianten müssen die Herausforderungen gemeistert werden, die sich aus unterschiedlichen Prozessen und Betriebsmitteln, z.B. durch eine Produktion an verschiedenen Standorten mit einer jeweils spezifischen Montagestruktur, ergeben (WAGNER et al. 2003). Unterschiede zwischen global verteilten Fabriken entstehen z.B. durch verschiedene Lohnniveaus sowie daraus resultierende Montagekonzepte und Automatisierungsgrade (BLEY et al. 2005).

Neben der Planung für ein immer größeres Variantenspektrum muss zugleich die Dauer des Produktentstehungsprozesses, der sich in die drei Phasen Produktplanung, Produktions- bzw. Prozessplanung und Produktion untergliedert, verkürzt werden (WESTKÄMPER & WINKLER 2002, NYHUIS et al. 2004). Ein wichtiger Stellhebel hierfür ist die Parallelisierung von Produkt- und Produktionsplanung (GAUSEMEIER et al. 2000, ROBGODERER 2002, PATRON 2004).

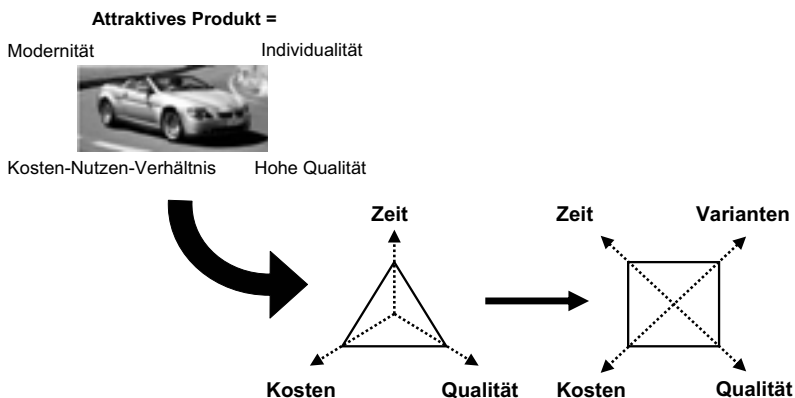


Abbildung 2: Erfolgsfaktoren für die Produkt- und Prozessentwicklung (nach EDER 2005)

Die folgende Abbildung 3 zeigt am Beispiel der Automobilindustrie, dass in einem Zeitraum von fünf Jahren eine Zeiteinsparung von bis zu 40 % von der Konzeptdatenfreigabe bis zum Produktionsstart realisiert werden konnte. Hierdurch wurde von den meisten Herstellern für diesen Abschnitt der aktuelle Zielwert von 18 Monaten erreicht (DROBIR 2005). Ermöglicht wurde diese Entwicklung unter anderem durch organisatorische Veränderungen, wie z.B. die Einführung der prozessorientierten Organisation und das teilweise Outsourcing von Entwicklung und Produktion. Weiterhin dienen Informations- und Kommunikationstechnologien zur Unterstützung der einzelnen Teilaufgaben und stellen somit eine wichtige Voraussetzung für Umstrukturierungen dar (DEUSE et al. 2006).

Erhebliche Unterschiede bezüglich des Einsatzes und der Integration von unterstützender Software bestehen zwischen Produktplanung, Prozessplanung und Produktion.

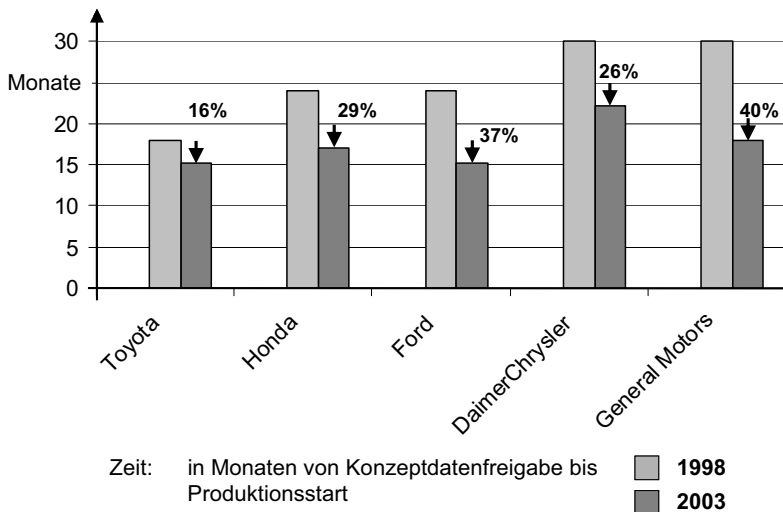


Abbildung 3: Verkürzung der Entwicklungszeit (nach DROBIR 2005)

Während die informationstechnische Durchdringung in der Produktplanung und der Produktion nach einer Studie von KLAUKE (2002), wie in Abbildung 4 skizziert, Werte von 60 bis 85 % erreicht, liegt in der Prozessplanung lediglich ein Integrationsgrad von 15 % vor.

Nach KLAUKE (2002) wird ein Integrationsgrad von 100 % erreicht, wenn Planungsingenieure von der Aufgabe der Informationsbeschaffung entlastet werden und sich so voll ihrer kreativen Arbeit widmen können. Der bisher sehr geringe Wert des Integrationsgrades in der Prozessplanung ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass bei der Durchführung der einzelnen Teilaufgaben, wie beispielsweise der Layoutplanung, eine Vielzahl nicht miteinander verknüpfter Insellösungen zum Einsatz kommt (BLEY & BOSSMANN 2005).

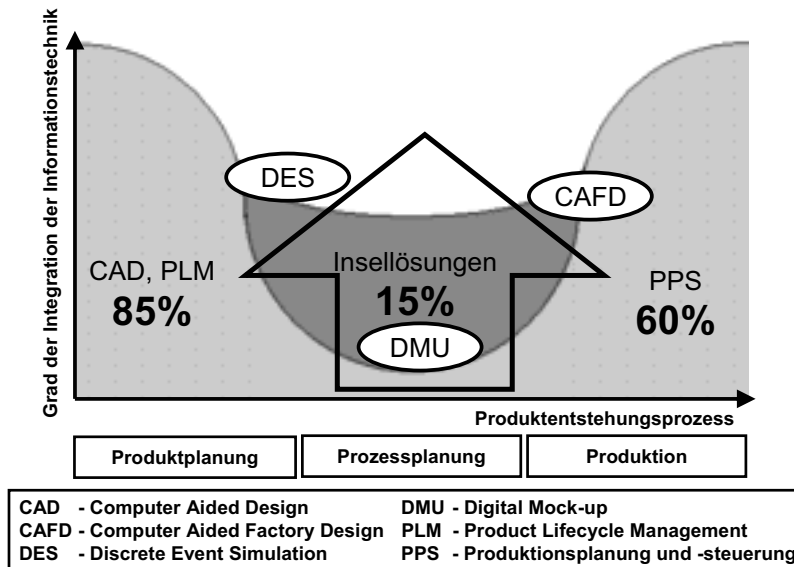


Abbildung 4: Informations- und Kommunikationstechnik im Produktentstehungsprozess (nach KLAUKE 2002)

Aufgrund der gestiegenen Planungshäufigkeit, die sich auf die höhere Anzahl unterschiedlicher Varianten und die gleichzeitig kürzeren Produktlebenszyklen zurückführen lässt, ergeben sich bei der konventionellen, meist auf der Verwendung von Microsoft Office-Produkten basierenden Prozessplanung, folgende Schwierigkeiten:

- keine einheitliche Darstellung und Vergleichbarkeit
- mangelnde Transparenz bezüglich Revisionsständen
- fehlende Durchgängigkeit in der Planung
- schwierige Datenbeschaffung
- fehlende systembehafete Unterstützung des Änderungsmanagements
- schwieriger Wissenstransfer, daher großer Wissensverlust
- niedriger Automatisierungsgrad aufgrund mangelnder Standardisierung und daraus resultierend hoher Aufwand für Routinearbeiten

Die Probleme der konventionellen Prozessplanung könnten durch den Aufbau der so genannten Digitalen Fabrik gelöst werden. Hierunter sind neue Methoden und Softwarewerkzeuge zu verstehen, die den Planungsprozess unterstützen (SAUER 2004). Nach der VDI-RICHTLINIE 4499 (2006, S. 1) wird die Digitale Fabrik als „*Oberbegriff für ein umfassendes Netzwerk von digitalen Modellen und Methoden, unter anderem Simulation und 3D-Visualisierung*“ verstanden. Ihr Ziel ist die ganzheitliche Planung, Realisierung und laufende Verbesserung aller wesentlichen Produktionsprozesse und -ressourcen in Verbindung mit dem Produkt. Die bisherigen Entwicklungen in diesem Bereich zielten vornehmlich auf die zentrale Datenhaltung ab, die eine konsistente Planungsbasis ermöglicht. Die nach KLAUKE (2002) wichtigsten Ziele der Digitalen Fabrik bestehen in der Reduktion der Planungskosten sowie der Erhöhung der Planungsqualität (siehe Abbildung 5). Beides lässt sich nur durch das Zusammenspiel eines durchgängigen methodischen Vorgehens mit einem konsequenten Datenmanagement erzielen. Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt die Studie „Digitale Fabrik“ von Roland Berger, laut der sich Hersteller und Zulieferer von der Digitalen Fabrik vor allem Kosten- und Zeitersparnis versprechen.

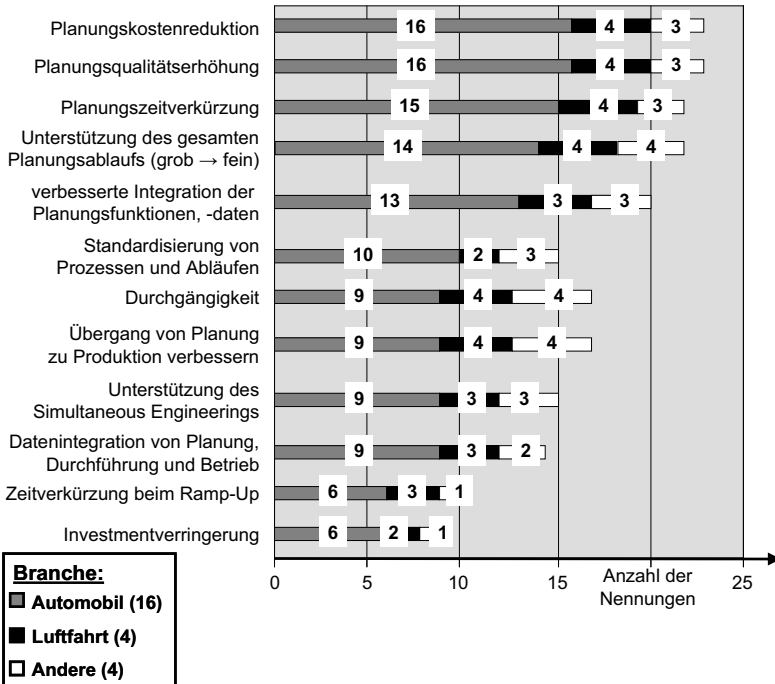


Abbildung 5: Ziele der Digitalen Fabrik in unterschiedlichen Branchen (nach KLAUKE 2002)

Sie erwarten z.B. eine Kostenreduktion von bis zu 30 % bei der Prozessplanung sowie weitere 5 bis 10 % Einsparungen durch die bessere Qualität der Produkte und der Produktionsanlagen. Die zentrale Aufgabe der Digitalen Fabrik besteht in der Standardisierung der Prozesse und einer umfassenden Beherrschung der Komplexität der Produktionsprozesse (DOMBROWSKI & TIEDEMANN 2004). Diese Ansichten werden auch von den Automobilherstellern geteilt. So nennen GERWALD & REITER (2005) die weitere Zunahme von Derivaten als Hauptursache für folgende Anforderungen an die Digitale Fabrik:

- Senkung der Planungsaufwände durch methodische und technische Standards
- Senkung der Investitionen für Neuanlagen durch Produktbeeinflussung
- durchgängige Produkt- und Prozessbeschreibung durch alle Phasen des Produktlebenszyklus

- Flexibilisierung und Retooling

Auch ALZAGA & DIEZ (2005) bestätigen diese im Automobilbereich bereits nachgewiesenen Nutzenpotenziale:

- Verkürzung der Planungszeit, um eine montagegerechte Produktstruktur abzuleiten, etwa 60 %
- Verkürzung der Zeit für Analysen und zur Umsetzung von Veränderungen, etwa 70 %
- Verkürzung der Zeit, um Qualitätssicherungsinformationen zu erstellen, etwa 30 %

Trotz dieser Erfolge gehen HANBEN & RIEGLER (2002) davon aus, dass in bisherigen Pilotprojekten nur ein Realisierungsstand möglicher Funktionen zwischen 40 und 80 % erreicht werden konnte. So wird insbesondere die organisatorische und technische Integration betrieblicher Standardsoftware und die Anbindung über entsprechende Systemschnittstellen (z.B. zwischen Enterprise Resource Planning-Systemen und Prozessplanungssystemen) als Herausforderung für die Zukunft angesehen (GERWALD & REITER 2005).

Dies erklärt auch, warum AUERBACH (2005) die vollständige Realisierung der Zusammenführung von Produktentwicklung und Produktionsplanung erst für das Jahr 2012 prognostiziert. Diese Vernetzung wird nach einer aktuellen Studie von über 50 % der befragten Unternehmen als noch nicht ausreichend beurteilt (KEIJZER et al. 2006a). Weiterhin wird unterstützenden Methoden, wie z.B. der Datenintegration oder dem Wissensmanagement, eine hohe Bedeutung zugemessen, deren Umsetzung derzeit als noch nicht ausreichend bewertet wird (KEIJZER et al. 2006b).

1.2 Zielsetzung und Fokus der Arbeit

Die steigende Anzahl von Varianten bei einer gleichzeitigen Verkürzung der Lebenszyklen von Produkten, Prozessen und Ressourcen erfordert neue Ansätze und Konzepte für die Montageplanung. Dies gilt insbesondere bei einer integrierten Entwicklung von Produkt und Montagesystem, wie sie z.B. in der Automobilindustrie vorherrscht. Da Derivate auf Plattformstrategien basieren, sollen Erfahrungen aus vorherigen Planungsprojekten übernommen werden können. Dies beinhaltet sowohl die Produkte als auch die Produktionsressourcen, die ebenfalls zu einem großen Teil modular aufgebaut sind und Gleichteile beinhalten.

Oftmals werden Elemente vorheriger Montagelinien für neue Modellvarianten wieder verwendet. Deshalb ist es zukünftig erforderlich, auf der Basis von früheren Erfahrungen überprüfen zu können, ob Anlagen für neue Montageaufgaben weitergenutzt oder erweitert werden können. Um qualitativ hochwertige Produkte mit hocheffizienten Produktionstechnologien optimal zu planen, sind Produktentwicklung und Montageplanung immer enger miteinander zu verzahnen.

Es ist eine zentrale These dieser Arbeit, dass durch die Vielzahl an Varianten und die gestiegene Planungshäufigkeit eine klassische Montageplanung unter Einbeziehung früherer Planungsergebnisse nicht mehr möglich ist. Stattdessen müssen neue Methoden und Techniken gefunden werden, um auf der Basis von projektübergreifenden Planungsunterlagen spezifische Montageplanungen zu generieren. Im Gegensatz hierzu werden neue Planungen bisher auf der Basis alter Ergebnisse durch deren Modifikation durchgeführt.

Elemente wissensbasierter Systeme werden bereits bei komplexen Planungen mit einer Vielzahl an Varianten verwendet. Obwohl diese Methoden sowohl in vorgelagerten Prozessen, wie der Produktentwicklung in Form von PLM-Systemen, als auch in nachgelagerten Prozessen, wie der computerunterstützten Arbeitsplanung, bereits realisiert wurden, besteht dennoch ein Umsetzungsdefizit in der Montageplanung mit Hilfe der Digitalen Fabrik. Von zentraler Bedeutung ist hier die Beschreibung von *Beziehungswissen* zwischen Prozessen und Ressourcen in Abhängigkeit von Produktparametern. *Beziehungswissen* beschreibt die wechselseitigen Abhängigkeiten zwischen Objekten. Dabei kann es sich um die Abhängigkeit zwischen *Merkmale* und *Merkmalswerten* handeln. Als Beispiel hierfür kann eine 21-Gang-Schaltung angeführt werden, die nur bei einem Rennrad zulässig ist. Beziehungswissen kann auch eingesetzt werden, um die Auswahl von Stücklistenpositionen und Arbeitsplanvorgängen bei der Variantenkonfiguration zu steuern (SAP 2006). Aufgrund der zunehmenden Modularisierung und der damit einhergehenden Wiederverwendbarkeit einzelner Elemente auf Prozess- und Ressourcenebene ist der Einsatz einer wissensbasierten Planung, z.B. unter Nutzung von *Beziehungswissen*, notwendig.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Konzepts zur wissensbasierten, integrierten Prozessplanung für die variantenreiche Montage. Unter „integriert“ wird in diesem Zusammenhang die gemeinsame Planung von Produkt und Montageanlage verstanden, die über die jeweiligen Montagevorgänge miteinander verknüpft werden. Ein derartiges Planungsvorgehen ist bei komplexen Gütern mit schwer veränderbaren, investmentintensiven Anlagen, wie z.B. im Automot-

bilbau oder im Flugzeugbau, vorzufinden. Für die Auslegung des Konzeptes wird der Montageplanungsprozess in der frühen Phase des Produktentstehungsprozesses in der Automobilindustrie betrachtet. Hierbei soll es insbesondere möglich sein, Erfahrungswissen aus vorherigen Projekten zu übernehmen. Zur Überprüfung des Konzeptes wird dieses softwaretechnisch in einem Prototyp abgebildet und anhand eines Fallbeispiels validiert.

1.3 Vorgehensweise

Die vorliegende Arbeit gliedert sich in sieben Kapitel, die in Abbildung 6 dargestellt sind. Kapitel 2 der vorliegenden Arbeit definiert zunächst die wichtigen, grundlegenden Begriffe. Es werden die Produktentstehung aus Sicht der Planungsprozesse, das Variantenmanagement, die Montageplanung, die unterstützenden informationstechnischen Umsetzungen sowie wissensbasierte Systeme vorgestellt.

In Kapitel 3 wird auf der Basis der in Kapitel 2 definierten Untersuchungsgebiete der Stand der Forschung und Technik wissensbasierter Systeme und der Digitalen Fabrik in der Montageplanung aufgezeigt.



Abbildung 6: Aufbau der Arbeit

Hierbei werden wissensbasierte Systeme im Hinblick auf ihre Anwendungen in der Produkt- und Prozessplanung erläutert. Die Digitale Fabrik in der Montageplanung wird in einer Dreiteilung von universitären Prototypen, kommerziellen Systemen sowie deren Erweiterungen vorgestellt. Das Kapitel wird mit einer Ableitung von Handlungsfeldern für diese Arbeit abgeschlossen.

In Kapitel 4 wird ermittelt, welche Anforderungen für den Einsatz wissensbasierter Systeme in der Montageplanung gelten. Diese gliedern sich in aufgaben- und umsetzungsbezogene Unterpunkte. Basierend auf den jeweiligen Anforderungen wird in Kapitel 5 ein werkzeuginspezifisches Grobkonzept für die wissensbasierte Montageplanung entwickelt. Dieses wird in Kapitel 6 genutzt, um heute am Markt verfügbare Werkzeuge zu analysieren und zu bewerten. Mit Hilfe der in Kapitel 5 aufgestellten Entscheidungsmatrix wird ein Werkzeug ausgewählt, das im Rahmen des Feinkonzeptes aufgabenspezifisch angepasst wird. Dieses System dient zur prototypischen Realisierung des Werkzeuges GenPlanner (Generischer Planer), das an einem Anwendungsbeispiel erprobt und bewertet wird. In Kapitel 7 erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse, auf deren Grundlage im Ausblick Impulse für weiterführende, zukünftige Forschungsrichtungen vorgestellt werden.

2 Begriffsdefinitionen und Grundlagen

2.1 Allgemeines

Für das Verständnis der vorliegenden Arbeit ist die Kenntnis einiger zentraler Begriffe notwendig. In Abschnitt 2.2 wird das Einsatzszenario der wissensbasierten Montageplanung im Produktentstehungsprozess am Beispiel der Automobilindustrie aufgezeigt. Spezielle Aspekte stellen hierbei das Variantenmanagement, die Montageplanung mit ihren jeweiligen Methoden sowie die zentralen Dokumente dar, die in den Abschnitten 2.3 und 2.4 definiert und erläutert werden. Softwarewerkzeuge decken bereits heute eine Vielzahl an Anforderungen in diesem Umfeld ab. Oftmals handelt es sich hierbei allerdings noch um Insellösungen. Ausgewählte Systeme werden in Abschnitt 2.5 am Beispiel des Produktentstehungsprozesses in der Automobilindustrie erläutert. Wissensbasierte Systeme, wie sie in Abschnitt 2.6 vorgestellt werden, spielen in vielen Bereichen, weniger allerdings in der Digitalen Fabrik, bereits eine zentrale Rolle.

2.2 Die Produktentstehung in der Automobilindustrie

Der Produktentstehungsprozess beinhaltet neben der Produktentwicklung auch die Prozessplanung und die Produktion selbst (FUSCH 2005). Er gliedert sich in die drei Bereiche Initial-, Konzept- und Serienphase (WALTER 2002).

In der Initialphase liegt der Hauptfokus auf der Positionierung des Fahrzeugprojektes im Wettbewerbsumfeld. Hier gilt es außerdem, Produktionsstandorte und Produktkonzepte überwiegend anhand von Kennzahlen miteinander zu vergleichen und somit die optimale Kombination auszuwählen. Während der Konzeptphase wird das Fahrzeug bis zur Zielvereinbarung ausgearbeitet, so dass letztlich alle seine Eigenschaften beschrieben sind. In der Serienentwicklung wird das aus der Konzeptphase übernommene Fahrzeug weiter ausdetailliert und für die Serienproduktion abgesichert. Diese Phase wird mit dem so genannten Start of Production (SOP) abgeschlossen.

Die detaillierte Planung der Produktionskonzepte in der Großserienfertigung hat einen hohen Stellenwert, da bereits kleine Optimierungen und daraus realisierte Einsparungen durch die großen Stückzahlen entscheidend für die spätere Wirtschaftlichkeit sind. Ein weiterer Aspekt für die Bedeutung einer genauen Planung

sind die hohen Investitionskosten für serienspezifische Produktionsanlagen (HILDEBRAND et al. 2004). Im Gegensatz zu im Nachhinein kostengünstig anpassbaren Ressourcen, wie sie in Form von modularen Baukastensystemen z.B. in der manuellen Montage häufig vorzufinden sind, können automatisierte Anlagen oftmals nur mit erheblichem Aufwand angepasst werden.

Die Erfolge überlappend stattfindender Aktivitäten verkürzen die Produktentstehungszeiten erheblich (FUSCH 2005). Deshalb gilt das Simultaneous Engineering als wichtiges Erfolgsmerkmal der Produktentstehung. Es führt allerdings zu Mehraufwand in den Bereichen Produktentwicklung und Prozessplanung, da durch die engere Verzahnung eine erhöhte Abstimmung und mehr Iterationszyklen notwendig sind (EHRLENSPIEL 2006). Die hohen Anforderungen werden nach JONAS (2000) durch eine Vielzahl von Varianten und Alternativen noch weiter verstärkt. Auf die Montageplanung als Teilbereich der Prozessplanung wird vertiefend in Abschnitt 2.4 eingegangen.

2.3 Variantenmanagement

Das Variantenmanagement umfasst die Bereiche Entwicklung, Gestaltung und Strukturierung von Produkten und Dienstleistungen. Nach SCHUH & SCHWENK (2001, S. 5) wird dadurch *„[...] angestrebt, die vom Produkt ausgehende Komplexität (Anzahl der Teile und Varianten) wie auch die auf das Produkt einwirkende Komplexität (Marktdiversifikation und Produktionsabläufe) mittels geeigneter Instrumente zu bewältigen“*.

Um den Begriff Variantenmanagement näher zu erläutern, ist es notwendig, die Begriffe Variante, Alternative und Version zu definieren und gegeneinander abzugrenzen. Wie bereits erwähnt, ist eine Variante nach DIN 199 (2002, S.15) ein *„Gegenstand ähnlicher Form oder Funktion mit einem in der Regel hohen Anteil identischer Gruppen oder Teile“*.

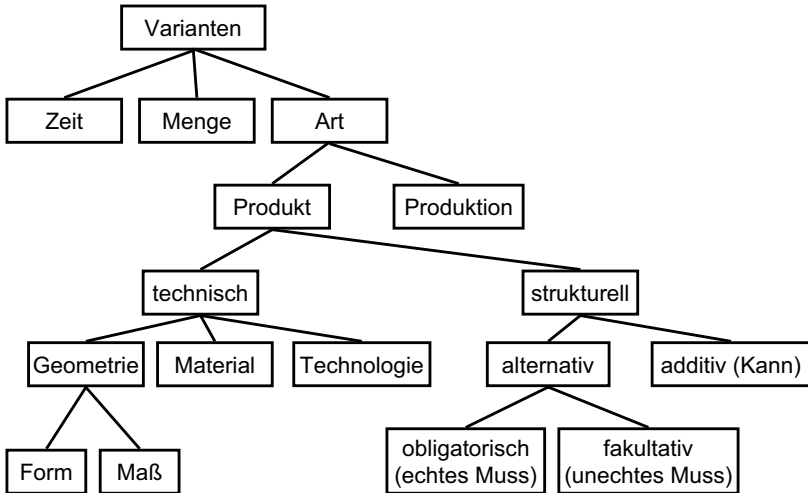


Abbildung 7: Klassifizierung der Varianten (nach LINGNAU 1994)

Varianten

Nach LINGNAU (1994) sind Varianten Gegenstände mit einem hohen Anteil identischer Komponenten, die Ähnlichkeiten hinsichtlich mindestens eines der Merkmale Geometrie, Material oder Technologie aufweisen (siehe Abbildung 7). Diese Definition verdeutlicht, dass verschiedene Arten von Varianten sowohl für das Produkt als auch für die Produktion existieren. Varianten können außerdem nach strukturellen und technischen Gesichtspunkten gegliedert werden, wobei strukturelle Varianten nach dem Baukastenprinzip individuell zusammengestellt werden können. Die technische Varianz hingegen gliedert sich z.B. in geometrische Formvarianz, materielle Varianz oder Technologievarianz. Die Technologievarianz entsteht durch die Nutzung verschiedenartiger Fertigungsverfahren. Als Beispiel hierfür kann die Veränderung von Prozessketten, wie z.B. die Nutzung des Rührreißschweißens anstelle des Nietens im Flugzeugbau, genannt werden. In vielen Betrachtungen liegt der Fokus auf der strukturellen Varianz (BENDER 2005), bei der vertriebliche Aspekte im Vordergrund stehen. Varianten entstehen durch Diversifikation, d.h. durch die Anpassung einer Lösung an verschiedene Randbedingungen.

Alternativen

Alternativen entstehen während der Lösungsfindung und dienen dazu, durch den Vergleich einer Vielzahl von Möglichkeiten die jeweils optimale Lösung zu ermitteln. Ebenso wie die Varianten bestehen auch sie zeitlich nebeneinander, sind jedoch im Gegensatz zu diesen insofern zeitlich begrenzt (JONAS 2000), als mit der Auswahl der bestmöglichen Lösung alle anderen verworfen werden. Aus Kostengründen werden sie meist nur in der frühen Phase der Entwicklung verfolgt. Varianten hingegen sind parallel existierende, vergleichbare Ausprägungen ein und desselben Erzeugnisses bzw. Ergebnisses und damit potentiell gegeneinander austauschbar.

Versionen

Versionen entstehen durch die Weiterentwicklung einer Alternative bzw. einer Variante. Sie dokumentieren die zeitliche Entstehung und geben deren chronologischen Verlauf wieder. Es handelt sich somit um zeitlich nacheinander entstehende, vergleichbare Arbeitsergebnisse bzw. Entwicklungsstufen einer Aufgabe oder eines Erzeugnisses. Eine neuere Version ersetzt meistens eine ältere Version, wobei sie durch Veränderung oder Weiterentwicklung aus dieser hervorgeht und in der Regel eine Verbesserung darstellt (JONAS 2000).

Variantevielfalt

Die Variantevielfalt hat ihren Ursprung in verschiedenen möglichen Merkmalsausprägungen eines Produktes (ALDERS 2006). Sie bezeichnet somit die Anzahl der Produkte mit unterschiedlichen Merkmalsausprägungen. Eine Zunahme kann sowohl auf interne als auch externe Ursachen zurückgeführt werden. Interne Ursachen sind vom Unternehmen selbst hervorgerufen, während externe als Reaktion auf eine sich verändernde Umwelt zu sehen sind. Beispiele für interne Ursachen sind die folgenden (KESTEL 1995):

- Durch zusätzliche Funktionen oder einzigartige Eigenschaften wird eine Produktdifferenzierung angestrebt.
- Es existieren Schnittstellenprobleme zwischen Organisationseinheiten sowie zu externen Partnern (Lieferanten und Vertriebspartner).
- Es bestehen sowohl Informationsdefizite im Controlling als auch mangelhafte Umsetzungsmaßnahmen beim Variantenmanagement.
- Ein umsatzorientiertes Anreizsystem des Vertriebs führt dazu, dass teure Varianten, die häufig aus Kundensonderwünschen hervorgehen, bevorzugt

aufgenommen werden. Oftmals steht dies nicht mit der Unternehmensstrategie bei der Einführung von Produktbaukästen im Einklang.

- Die Integration der Konstruktion in die Angebots- und Auftragsabwicklung ist nicht ausreichend, da ein durchgängiges Konzept der Variantenbildung fehlt.

Externe Ursachen lassen sich in zwei Gruppen gliedern: marktbedingte und nicht marktbedingte Faktoren (KESTEL 1995). Die marktbedingte Variantenvielfalt steht in enger Verbindung mit einem zunehmenden Wettbewerbsdruck, den Änderungen der Nachfragestruktur, der Zulassung von kundenspezifischer Fertigung, der Verkürzung der Produktlebenszyklen und länderspezifischen Anpassungen. Dagegen sind nicht marktbedingte Faktoren abzugrenzen, die zum Beispiel aus technischen Entwicklungen, Normen und Vorschriften für Produkte entstehen. Aus struktureller Sicht ist die Variantenvielfalt auf der Produktebene auf die Baugruppenvielfalt sowie die Teilevielfalt zurückzuführen. In der Vergangenheit stand beim Variantenmanagement überwiegend das Produkt im Mittelpunkt der Forschung (LINGNAU 1994, OHL 2000, LI 2003, JANITZA 2004, ALDERS 2006). Was die Prozessplanung betrifft, ist es jedoch notwendig, auch Prozess- und Ressourcenvarianten zu berücksichtigen. So wird beispielsweise die Mercedes C-Klasse derzeit in drei verschiedenen Fabriken in Sindelfingen, Bremen und East London (Südafrika) mit unterschiedlichen Prozessen und Ressourcen produziert (BLEY et al. 2005).

Abweichende Produkte oder Produktvarianten erfordern oftmals unterschiedliche Prozesse bzw. Prozessabfolgen mit entsprechenden Ressourcen (FIRCHAU et al. 2002). Für den Fall, dass eine Produktvariante von zwei Montagestationen und eine andere von denselben Stationen mit einem dazwischen liegenden Schweißprozess hergestellt wird, existieren zwei Prozessvarianten. Eine Prozessvariante entsteht, wenn in einer Prozessfolge ein Prozesselement ausgetauscht wird (z.B. Schweißen gegen Kleben). Prozessvarianten können auch bei gleichen Produkten auftreten, wenn z.B. an zwei unterschiedlichen, global verteilten Standorten mit unterschiedlichen Automatisierungsgraden produziert wird. Analog hierzu existieren Ressourcenvarianten, bei denen ein Prozess von unterschiedlichen Ressourcen ausgeführt werden kann. Die Gestaltung eines Schweißprozesses ist beispielsweise manuell oder mit einem Roboter möglich.

Fazit

In der frühen Phase der Produktentstehung nimmt ein konsequentes Varianten-, Alternativen-, und Versionsmanagement an der Schnittstelle von Konstruktion und Montageplanung eine zentrale Rolle ein. Hierbei kommt der Konfiguration dieser Elemente eine immer wichtigere Bedeutung zu. Obwohl die Montageplanung in der Regel zeitlich versetzt zur Produktentwicklung beginnt, wird sie im Rahmen des Simultaneous Engineering zunehmend mit dieser parallelisiert durchgeführt. Die Informationen aus der Produktentwicklung dienen hierbei jeweils als Grundlage für die Planungsaufgabe. Daher muss die Montageplanung auf der Basis unterschiedlicher Produktalternativen, -varianten und -versionen durchgeführt werden und als Ergebnis ebenfalls unterschiedliche Planungsalternativen, -varianten und -versionen generieren (JONAS 2000).

2.4 Montageplanung als Teilbereich der Prozessplanung

2.4.1 Allgemeines

Dieser Abschnitt stellt die Montageplanung als Teilbereich der Prozessplanung vor. Hierbei wird der Hauptfokus auf das methodische Vorgehen und weniger auf die unterstützenden Werkzeuge gelegt. Nach EVERSHEIM (2002) ergibt sich der Begriff *Prozessplanung* in Anlehnung an die englischsprachige Fachliteratur (Process Planning) und wird zunehmend synonym zum bislang verwendeten Begriff *Arbeitsplanung* verwendet. Die Arbeitsplanung bzw. die Prozessplanung ist der auftragsunabhängige Teil der Planung, der die Randbedingungen, wie z.B. die Arbeitspläne für die spätere Fertigungssteuerung, definiert. Sie liegt zeitlich zwischen der Konstruktion und der Fertigung, wie die folgende Abbildung 8 verdeutlicht. Im Rahmen der nachfolgenden Ausführungen wird der Begriff *Prozessplanung* verwendet. Im Speziellen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Montageplanung untersucht, die aus funktionaler Sicht neben der Fertigungs- und Materialplanung ein Teilgebiet der Prozessplanung darstellt (JONAS 2000, EVERSHEIM 2002).

Nach DIN 8593 und VDI 2860 bezeichnet die Montage das Handhaben und Fügen von Teilen (VDI-RICHTLINIE 2860 1990, DIN 8593 2003). Für ein neues Produkt sind sowohl die Montageabläufe festzulegen als auch die Unterlagen und Anweisungen auszuarbeiten.

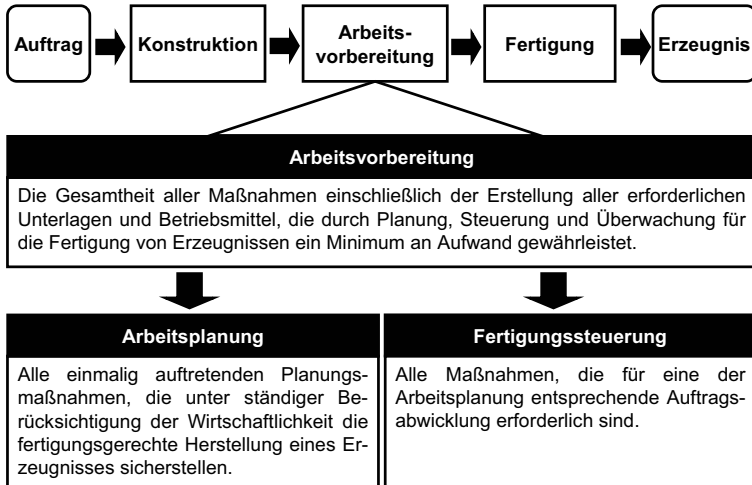


Abbildung 8: Einordnung der Arbeitsvorbereitung (nach AWF 1968)

Weiterhin ist es notwendig, das Montagesystem für diese Aufgabe zu planen. Die konkrete Aufgabe wird an die Montageplanung in Form von Konstruktions- und Produktionsdaten übergeben und beinhaltet die Forderung, ein bestimmtes Erzeugnis mit vorgegebenen Funktionen in einer bestimmten Stückzahl pro Zeiteinheit zusammenzubauen (HIRSCHBACH 1978). Im Sinne einer ganzheitlichen Planung werden auch die Randbedingungen angrenzender Bereiche, wie z.B. der Layoutplanung, berücksichtigt. Daraus resultiert, dass die Montageplanung über ein kompliziertes Informationsnetz in ihr Umfeld eingebunden ist. Neben dem Konstruktionsbereich sind beispielsweise die Qualitätssicherung oder das betriebliche Rechnungswesen, das die Kosten der geplanten Montageeinrichtung feststellt, in die Planung zu integrieren (FELDMANN 1997).

2.4.2 Planungsmethoden

In der Fachliteratur ist eine Vielzahl von Lösungsansätzen für das Vorgehen bei der Montageplanung zu finden. Einer der bekanntesten ist die Montageplanung nach BULLINGER (1986). Die einzelnen durchzuführenden Aufgaben werden hier in sechs Phasen zusammengefasst (Abbildung 9). Die beiden Abschnitte Ablaufplanung und Montagesystementwurf lassen sich weiterhin in Grob- und Feinplanung aufteilen (THALER 1993).

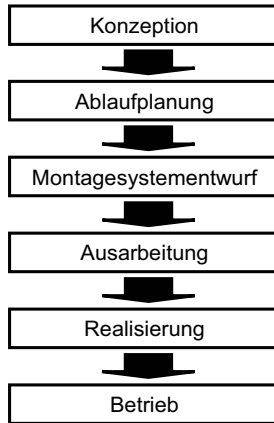


Abbildung 9: Systematik der Montageplanung (nach BULLINGER 1986)

Die einzelnen Aufgaben, Eingangsinformationen und Ergebnisse sind in der nachfolgenden Abbildung 10 aufgezeigt. Die Eingangsinformationen werden überwiegend durch eine vorangehende Analyse zusammengestellt und mit Hilfe der Synthese zu darauf aufbauenden Ergebnissen verarbeitet. Wie aus Abbildung 10 hervorgeht, stellen Stücklisten und Zeichnungen die Planungsbasis der Ablaufplanung dar. Diese werden direkt aus vorhandenen Product Lifecycle Management-Systemen (PLM-Systemen) gewonnen, auf die detailliert in Abschnitt 2.5.2 eingegangen wird. Hierzu können sowohl Stücklisten als auch Strukturbäume eingelesen werden. Aus diesen Konstruktionsstücklisten werden zumeist manuell Montagestücklisten erstellt, die als Eingangsinformationen für die Ablaufplanung dienen. Im Mittelpunkt der Grobplanung stehen die Bildung von Montageabschnitten sowie die Gestaltung von Arbeitsstrukturen. Hierbei gilt es zu definieren, wie Komponenten oder Baugruppen in ein Gesamtfahrzeug zu integrieren sind. Die Planungsobjekte sind beispielsweise Taktzeiten, Montagevorgänge oder Investitionskosten. Resultate der Planungen sind zum Beispiel Montagereihenfolgen, spezielle Fügeprozesse oder Betriebsmittel sowie die hierauf basierende Investitionsplanung. Die Ergebnisse der Grobplanung werden für die anschließende Feinplanung als Eingangsinformationen verwendet. Im Rahmen der Feinplanung stehen die Ermittlung der Arbeitsinhalte, die Planung der Montagezeiten, die Dokumentation der Planungsstände, die Erstellung von Auswertungen und die Montagearbeitsplanerstellung im Vordergrund.

		Aufgaben	Eingangsinformationen	Ergebnisse
Ablaufplanung	Grobplanung	Grobablaufplanung - Erzeugnis strukturieren - Grobablauf planen	- Stückliste - Zeichnung - ...	- Vorranggraf - Grobablaufstruktur - ...
	Feinplanung	Feinablaufplanung - Montageinhalte festlegen - Montageplan und Montageunterlagen erstellen	- Vorranggraf - Produktionsprogramm - Betriebsmittelkatalog - Vorgabezeitkatalog - ...	- Montagearbeitsplan - Arbeitsanweisung - Kalkulationsblatt - ...
Montagesystementwurf	Grobplanung	Montagesystementwicklung - Arbeitssystem konzipieren - Systemstruktur entwickeln - Kapazität planen	- Montageaufgabe - Produktionsprogramm - Flächenmaße - Verkettungsprinzip - ...	- Montagestruktur - Groblayout - Kapazitätsbedarf - ...
	Feinplanung	Montagesystemkonkretisierung - Prinziplösung planen - Arbeitsstation planen - Verkettungsmittel planen	- Montagestruktur - Groblayout - ...	- Feinlayout - Arbeitsstationen - Verkettungsmittel - ...

Abbildung 10: Aufgaben der Ablauf- und Systemplanung in der Serienfertigung (nach THALER 1993)

Ziel des Montagesystementwurfs ist es zunächst, in der Montagesystementwicklung ein anforderungsgerechtes Arbeitssystem grob zu planen und mehrere alternative Systemlösungen zu ermitteln. Die Feinplanung erfolgt innerhalb der Montagesystemkonkretisierung des Arbeitssystems. Hierzu werden z.B. die Verkettungsmittel festgelegt und die einzelnen Stationen des Arbeitssystems im Detail geplant (THALER 1993). Die Gesamtaufgabe der Montage wird entsprechend einem vorgegebenen Detaillierungsgrad, der maßgeblich von der Planungsaufgabe und dem Planungsobjekt abhängt, in Teilaufgaben zerlegt. Planungen für Serienprodukte erfordern in der Regel feinere Planungsstufen als die Planung für ein Einzelprodukt. Laut einer in der Maschinenbaubranche durchgeführten Studie von AMMER (1985) plant ein Großteil der Unternehmen dort auf Vorgangs- und Teilvorgangs- bzw. Teilverrichtungsebene. Der *Arbeitsvorgang* ist nach AWF (1968) die Bearbeitung, die zusammenhängend an einer Maschine oder an einem Handarbeitsplatz ausgeführt wird. *Teilarbeitsvorgänge* sind dagegen eine Planungsebene tiefer anzusiedeln und stellen nicht weiter unterteilbare Arbeitsschritte dar. Abbildung 11 verdeutlicht anhand des Beispiels einer Werkzeugmaschine den beschriebenen Unterschied zwischen *Vorgang* und *Teilvorgang*.

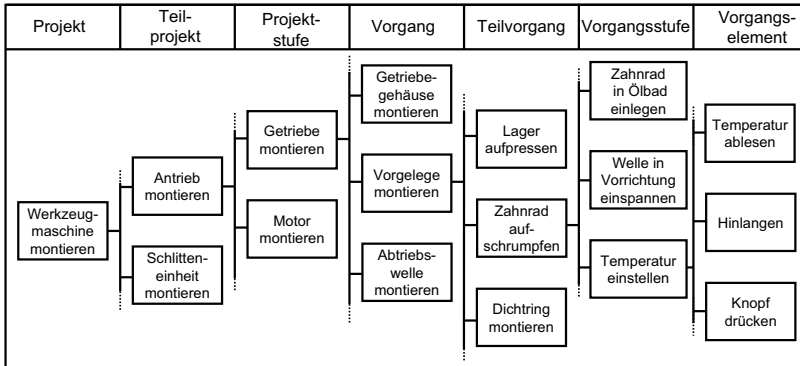


Abbildung 11: Stufen der Planungsebenen am Beispiel der Montage einer Werkzeugmaschine (nach AMMER 1985)

2.4.3 Stückliste und Arbeitsplan als zentrale Dokumente

2.4.3.1 Allgemeines

Kennzeichnend für die Montageplanung hochvariantenreicher Produkte ist die Generierung und Weiterverarbeitung zahlreicher Informationen (CUIPER 2000). Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, müssen Daten sinnvoll strukturiert werden, so dass sie rechentechnisch erfasst und verwaltet werden können (FIRCHAU et al. 2002). Die beiden wichtigsten Dokumente hierfür sind die Stückliste und der Arbeitsplan.

2.4.3.2 Stückliste

Die Stückliste ist eine Abbildung der Produktstruktur, die sich leicht maschinell bearbeiten lässt. Sie ist das zentrale Element für die Produktdokumentation und zudem einer der wichtigsten Informationsträger in produzierenden Unternehmen (SCHÖTTNER 1999, S. 206). Insbesondere in der Einzel- und Sonderfertigung werden Produkte oftmals von gut ausgebildeten Mitarbeitern nur auf der Basis von Stücklisten und Fertigungszeichnungen hergestellt. Dies belegt die hohe Bedeutung der Stückliste, die nach REFA (1993, S. 45) wie folgt definiert ist:

„Die Stückliste ist ein für den jeweiligen Zweck vollständiges, formal aufgebautes Verzeichnis für einen Gegenstand, das alle zugehörigen Gegenstände unter Angabe von Bezeichnung, Sachnummer, Menge und Einheit enthält.“

In Abhängigkeit von der Komplexität und des vorliegenden Spektrums von Produkten werden unterschiedliche Stücklistenarten verwendet (DIN 199 2002, KOHLHOFF 2005). Die für das Verständnis der vorliegenden Arbeit relevanten werden kurz erläutert:

- Einfachstückliste
- Plus-Minus-Stückliste
- Baukastenstückliste
- Variantenstückliste

Einfachstückliste

Einfachstücklisten beschreiben auf eindeutige Weise Endprodukte. Sie werden im Weiteren nicht näher dargestellt, da sich ihr Inhalt aus den komplexeren Plus-Minus- und Variantenstücklisten ergibt. In diesen werden aus Gründen der Konsistenz und Pflögarkeit unterschiedliche Varianten in einer gemeinsamen Struktur erfasst und abgebildet.

Plus-Minus-Stückliste

Die Plus-Minus-Stückliste ist eine Stückliste, bei welcher unter Bezug auf eine andere Stückliste die hinzukommenden und/oder entfallenden Gegenstände aufgeführt sind. Plus-Teile sind Gegenstände, die zu einer Bezugsliste hinzukommen, Minus-Teile sind entsprechend Komponenten, die entfallen.

Baukastenstückliste

Die Baukastenstückliste führt alle Teile und Gruppen der nächst tieferen Stufe auf (siehe Abbildung 12). Besteht eine Position einer Baukastenstückliste aus einer Gruppe, so existiert für diese Gruppe eine eigene Stückliste. Alle Baukastenstücklisten eines Enderzeugnisses bilden einen so genannten Stücklisten-satz. Die Baukastenstückliste des Enderzeugnisses wird oftmals auch als Hauptstückliste bezeichnet.

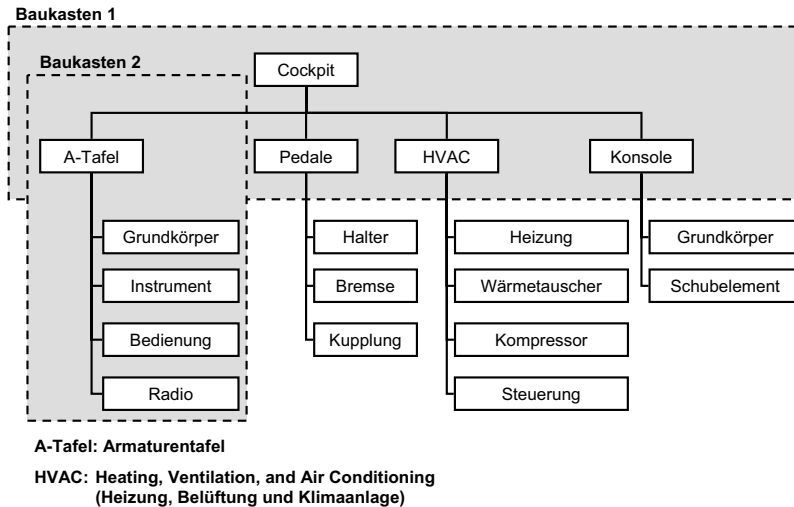


Abbildung 12: Struktur einer Baukastenstückliste (nach KOHLHOFF 2005)

Stücklisten werden weiterhin in geschlossene und offene Stücklisten (OHL 2000, SAILER et al. 2004) eingeteilt. Die drei vorgestellten Stücklistentypen gehören zu der Gruppe der geschlossenen Stücklisten. Bei diesen entspricht die Nummer jeder einzelnen Variante der Nummer einer Stückliste. Eine modernere Form stellt die offene Stückliste dar, bei der eine alles umfassende Varianten- oder Maximalstückliste verwendet wird. Diese wird im Folgenden näher erläutert.

Variantenstückliste

Die Variantenstückliste (oft auch als Maximalstückliste bezeichnet) vereinigt in sich alle möglichen Stücklistenvarianten eines konfigurierbaren Produktes. Sie enthält die Gesamtheit aller möglichen Gleich- und Variantenteile, die zur Abbildung aller vorgesehenen Varianten benötigt werden. Durch die Merkmalsbewertung entsteht ein konkretes, konfiguriertes Produkt. Die Ähnlichkeit der Varianten, für die eine Maximalstückliste aufgebaut wird, bestimmt deren Komplexität. Da in der Maximalstückliste auch alle Komponenten angelegt sind, die nur in bestimmten Varianten enthalten sind, ist eine sehr große Anzahl von Stücklistenpositionen nahezu unvermeidlich. Über das Beziehungswissen wird die Maximalstückliste anhand der Merkmal- und Ausprägungsauswahl konfiguriert, so dass nur die Teile ausgewählt werden, die für eine bestimmte Variante benötigt werden. Variantenstücklisten dienen zur Dokumentation von Produkten, die eine

hohe Diversifikation aufweisen. Die Erzeugung einer Stückliste für ein konkretes Produkt erfolgt durch eine Variantenkonfiguration. Auf die hierfür verwendeten Methoden und Mechanismen wird in Abschnitt 3.2 eingegangen.

2.4.3.3 Arbeitsplan

Häufig wird neben der Stücklistenauflösung auch der Arbeitsplan, nach dem ein Produkt zu fertigen ist, automatisch erzeugt. Hierzu wird ein Maximalarbeitsplan analog zur Maximalstückliste erstellt, der alle denkbaren Arbeitsgänge zur Fertigung der Varianten enthält. In einem Arbeitsplan wird die Fertigungs- oder Montageaufgabe in Folgen von Arbeitsvorgängen dokumentiert, die sequentiell, parallel oder alternativ sein können. Er enthält Informationen über das Erzeugnis und das Betriebsmittel am jeweiligen Arbeitsplatz sowie über die Reihenfolge der konkreten Arbeitsvorgänge mit den dazugehörigen Vorgabezeiten (EVERSHEIM 2002, GÜNTNER et al. 2006a). Die Arbeitsunterweisung unterscheidet sich vom Arbeitsplan lediglich im Detaillierungsgrad der Aufgabengliederung. Sie beschreibt die auszuführenden Tätigkeiten im Detail und wird beispielsweise zur Einarbeitung neuer Arbeitskräfte eingesetzt. Neben der Stückliste ist der Arbeitsplan das zentrale Dokument zur Steuerung der Aufträge durch die Fertigung. Abbildung 13 verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Stückliste und Arbeitsplan.

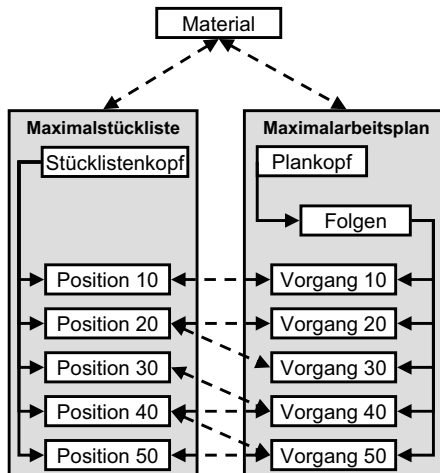


Abbildung 13: Zusammenhang zwischen Arbeitsplan und Stückliste (nach GÜNTNER et al. 2006a)

In Anlehnung an die Methoden zur Erstellung von Stücklisten existieren, wie Abbildung 14 darstellt, verschiedene Möglichkeiten der Arbeitsplanung. Im Falle der Wiederholplanung wird über einen Klassifizierungsschlüssel ein bereits existierender Arbeitsplan eines identischen Produktes ermittelt und mit organisatorischen Auftragsdaten ergänzt. Bei einer Anpassungsplanung wird ein vorhandener, ähnlicher Arbeitsplan ermittelt und bei Änderungen der Werkstücke oder einzelner Fertigungsverfahren entsprechend adaptiert. Die Variantenplanung basiert auf der Nutzung so genannter Standardarbeitspläne, die für eine bestimmte Produktgruppe definiert wurden und die maximale Anzahl aller Arbeitsschritte für alle in dieser Gruppe zusammengefassten Produktvarianten beinhalten. In der betrieblichen Praxis werden die Standardarbeitspläne meist als Vorlage verwendet und manuell durch Löschen oder Anpassung einzelner Elemente an die jeweilige Planungsaufgabe angepasst (GÜNTNER et al. 2006b). Variantenplanungen können neben der manuellen Anpassung auch teilautomatisiert auf der Grundlage werkstückbezogener Planungsunterlagen durch Auswertung von spezifischen Merkmalen erfolgen.

Für Produkte, die nicht in bekannte Gruppen fallen und diesen nicht ähnlich genug sind, ist eine komplette Neuplanung durchzuführen. Da diese einen erheblichen Aufwand verursacht, sollte sie wenn möglich vermieden werden.

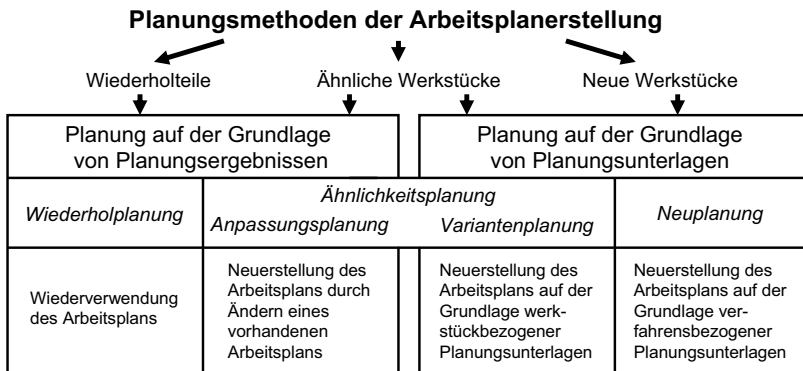


Abbildung 14: Methoden der Arbeitsplanung (nach EVERSHEIM & STEUDEL 1977)

Die beschriebenen Planungsmethoden lassen sich den drei Planungsprinzipien Generierungsprinzip, Ähnlichkeitsprinzip und Variantenprinzip zuordnen (EVERSHEIM et al. 1996). Bei dem Generierungsprinzip wird ein Plan auf der Basis von Eingangsinformationen komplett neu erstellt. Im Gegensatz hierzu ist das Ähnlichkeitsprinzip zu nennen, bei dem frühere Pläne von möglichst ähnlichen Produkten ermittelt werden. Das Variantenprinzip steht zwischen den beiden anderen Prinzipien. Auf der Basis eines Ähnlichkeitsvergleiches wird hierbei ein geeigneter Standardarbeitsplan ermittelt, der manuell oder unter Nutzung von generierenden Elementen spezifisch angepasst wird. Das Generierungsprinzip und das Variantenprinzip unterscheiden sich darin, welche Planungsumfänge durch eine Initialauswahl übernommen und welche durch spezielle Auswertungen bestimmt werden.

Während bei der Erstellung eines Bearbeitungsarbeitsplans das einzelne Werkstück im Mittelpunkt steht, muss bei der Montageplanung ein Prozess beschrieben werden, in dem zahlreiche Einzelteile, formlose Stoffe und Baugruppen zum fertigen Produkt gefügt werden. Daher stellt die Montageplanung besonders hohe Ansprüche an die Struktur und den Inhalt des ihr zu Grunde liegenden Produktmodells (STEINWASSER 1997). Vergleichbar mit einer Produktstruktur ist auch der Montageablaufplan hierarchisch gegliedert. So wird auf der Ebene von Arbeitsgängen definiert, welche Arbeitsaufgaben wo und in welcher Reihenfolge durchzuführen sind. In den Teilarbeitsgängen, die eine Detaillierungsebene tiefer liegen, wird festgelegt, mit welchen Bauteilen, Montagemitteln und Vorgabezeiten Arbeitsinhalte durchzuführen sind (THALER 1993, S. 24). Da nach EVERSHEIM (2002) der größte Anteil aller Tätigkeiten in der Prozessplanung der Arbeitsplanerstellung dient, wird diese Aufgabe im Rahmen der vorliegenden Arbeit bevorzugt betrachtet. Die vorgestellten Methoden können mit einem unterschiedlich hohen Grad an Softwareunterstützung durchgeführt werden. Hierbei hängt die Auswahl der geeigneten Methode und des entsprechenden Systems hauptsächlich von der Planungshäufigkeit und der Stabilität des Produktspektrums sowie dem Fertigungsumfeld ab.

2.5 Informationstechnische Systeme im Produktentstehungsprozess

2.5.1 Allgemeines

Hinsichtlich des Systemeinsatzes gibt es grundlegende Unterschiede zwischen der Entwicklungs- und der Serienphase. Während der Entwicklung liegt die zentrale Datenverwaltung in PLM-Systemen. Dort werden z.B. Computer Aided Design-Werkzeuge (CAD-Werkzeuge) integriert und die verschiedenen Produktversionen verwaltet und editiert. Mit dem Übergang in die Serienphase werden die finalen Entwicklungsstände an das Supply Chain Management (SCM) oder Enterprise Resource Planning (ERP) übergeben, das Daten nur noch als Serienversion verwaltet und keine Versionierung von Alternativen unterstützt (SCHÖTTNER 1999). Die Verknüpfung der einzelnen Werkzeuge in der Automobilindustrie wird in der folgenden Abbildung 15 veranschaulicht.

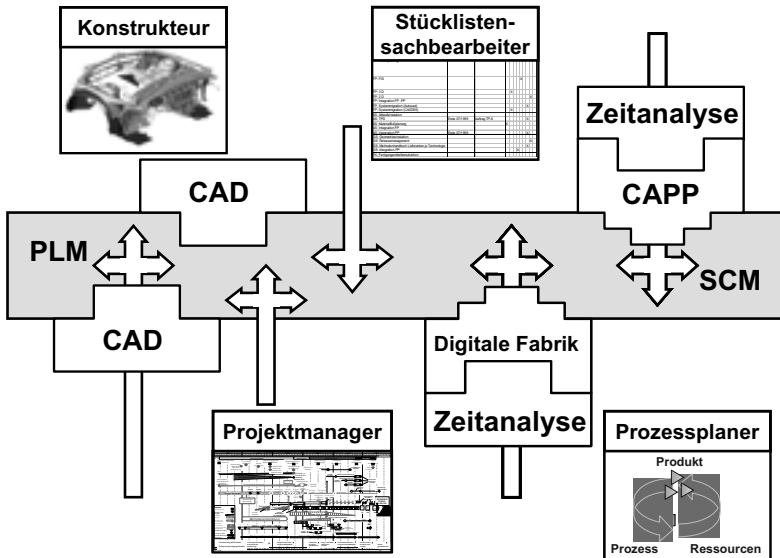


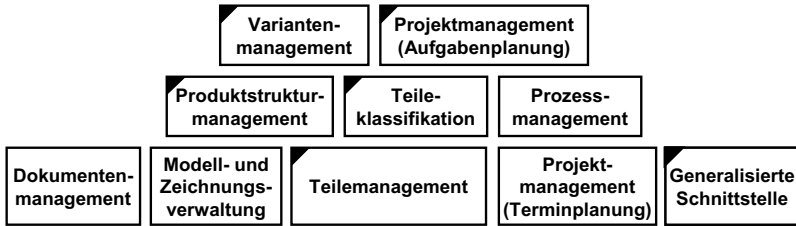
Abbildung 15: Informationstechnische Systeme im Produktentstehungsprozess zur Unterstützung einer durchgängigen Planung von Produkten, Prozessen und Ressourcen (nach KOHLHOFF 2005)

PLM-Systeme werden heute bereits erfolgreich verwendet, um CAD-Daten von Produkten sowie von Betriebsmitteln konsistent miteinander in Beziehung zu setzen. Bei der Integration der Digitalen Fabrik sowohl mit PLM- als auch mit SCM-Systemen besteht jedoch noch ein erheblicher Forschungsbedarf (BLEY et al. 2005). Wie bereits erwähnt, liegt der Fokus dieser Arbeit auf der frühen Phase der Prozessplanung und somit auf dem rechten Bereich der Abbildung 15, ohne allerdings den Übergang von der Entwicklung in die Serienphase explizit zu betrachten. Im Folgenden werden die zu diesem Bereich zählende Systeme Product Lifecycle Management, Digitale Fabrik und CAPP vorgestellt.

2.5.2 Product Lifecycle Management

Im Bereich des Product Lifecycle Managements und der PLM-Systeme (siehe Abschnitt 3.2) existieren keine einheitlichen Definitionen. Insbesondere die Begriffe Produktdatenmanagement (PDM) und PLM gilt es gegeneinander abzugrenzen. Das PDM entstand aus der Notwendigkeit, eine Fülle von CAD-Modellen konsistent zu verwalten, und stellt die Basis für ein umfassenderes Product Lifecycle Management dar, das zusätzlich auch Schnittstellen zu anderen Anwendungsbereichen wie ERP, SCM und Customer Relationship Management (CRM) bereitstellt. PLM ist somit ein Konzept, das eine produktzentrierte Sicht auf alle beschreibenden Daten und Informationen über den gesamten Lebenszyklus hinweg ermöglicht (ARNOLD et al. 2005). Im Weiteren wird der Begriff PLM verwendet, der nach dieser Definition den älteren, technologieorientierten Begriff PDM umfasst und zusätzlich um organisatorische Aspekte erweitert ist.

Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen in der Entwicklung und Produktion ist es erforderlich, dass die Produktdaten vor der Übergabe an die Produktion noch einmal für deren Belange transformiert werden. Ein PLM-System dient in der Regel dazu, die unterschiedlichen Bereiche des Produktentstehungsprozesses mit ihren spezifischen Applikationssystemen (z.B. CAD, CAE, CAM) über eine gemeinsame Datenbasis mit aktuellen und konsistenten Produktdaten zu versorgen. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für eng verzahnte, stark parallelierte Unternehmensabläufe. Eine zentrale Rolle spielen PLM-Systeme auch bei der Speicherung und der Langzeitarchivierung von Produktdaten. Somit können PLM-Systeme als Informationsdrehscheibe für die Speicherung, die Verwaltung, den Transfer und die Bereitstellung aller relevanten Produktdaten und ihrer Verknüpfungen bezeichnet werden (siehe Abbildung 16).



▴ im Rahmen dieser Arbeit erläuterte Module

Abbildung 16: PLM-Anwendungsmodule (nach SCHÖTTNER 1999)

In ihrem grundlegenden Aufbau unterscheiden sich PLM-Systeme nur geringfügig (Schöttner 1999). Den Kern jedes PLM-Systems bildet das elektronische Datendepot, das in der Regel auf einer leistungsfähigen relationalen oder objektorientierten Datenbank basiert. Auf diese greift eine Vielzahl von Bausteinen des PLM-Systems zurück. Die für das Verständnis dieser Arbeit wichtigen Anwendungsmodulare stellen die generalisierte Schnittstelle sowie alle Bausteine, die in das Variantenmanagement einfließen, dar. Diese sind in Abbildung 16 mit einem schwarzen Dreieck in der linken oberen Ecke gekennzeichnet und werden im Folgenden erläutert.

Teilemanagement

Das Teilemanagement verwaltet unter Berücksichtigung der Benutzerrechte die Einzelteile und Baugruppen inklusive der Halbzeuge und Rohteilstufen. Hierbei wird jede Bauteilkomponente durch einen Teilestammsatz repräsentiert, der eine enge Beziehung zu dem CAD-Modell und den Zeichnungsdokumenten herstellt.

Teileklassifikation

Die Teileklassifikation ermöglicht unter Nutzung der Sachmerkmal-Leistentechnik die Verwaltung und Handhabung von Standard- und Wiederholteilen. Die Voraussetzung für die Anwendung einer Sachmerkmal-Leiste bildet die Einteilung von Teilen in Gruppen, so dass zwischen deren Mitgliedern Ähnlichkeitsbeziehungen entstehen. Ein Klassifizierungssystem erfasst und vergleicht die kennzeichnenden Merkmale von Objekten (DIN 4000 1992). Der Baustein Teileklassifikation setzt das Vorhandensein eines Teilemanagements oder einer Modell- und Zeichnungsverwaltung voraus.

Produktstrukturmanagement

Das Produktstrukturmanagement ermöglicht die Strukturierung von Bauteilen zu Baugruppen, Oberbaugruppen und Hauptbaugruppen sowie deren Verwaltung und Handhabung. Aus der Produktstruktur können die verschiedenen Formen von Stücklisten abgeleitet werden. Voraussetzung für das Produktstrukturmanagement ist die Funktion des Teilemanagements.

Variantenmanagement

Das Modul Variantenmanagement ermöglicht sowohl den Aufbau einer auftragsneutralen Master-Produktstruktur als auch die hierauf basierende Konfiguration kundenspezifischer Produktstrukturen. Zusätzlich bietet das Modul Funktionen, um verschiedene Sichten auf eine Produktstruktur erstellen zu können. Voraussetzung hierfür ist das Vorhandensein des Produktstrukturmanagements.

Generalisierte Schnittstelle

Da PLM-Systeme eine Integrationsplattform für eine Vielzahl von Applikationen sein sollen, kommt einer generalisierten Schnittstelle eine zentrale Rolle zu. Die Kommunikation und der Datenaustausch zwischen den PLM-Lösungen und den erzeugenden Systemen werden über standardisierte Schnittstellen durchgeführt. In den letzten Jahren hat sich die Extensible Markup Language (XML) in vielen PLM-Systemen als Standard zur Datenbeschreibung etabliert (BLENCKE et al. 2002). Neben den beschriebenen Basisfunktionalitäten stellen die meisten der marktgängigen PLM-Systeme spezielle Methoden und Werkzeuge, so genannte Customizing-Tools, zur Verfügung, mit denen das System an unternehmensspezifische Belange angepasst werden kann. Diese Tools ermöglichen neben der Erweiterung des Datenmodells u.a. auch die Anpassung der grafischen Benutzeroberfläche.

Fazit

Die Entwicklungszeit kann durch die Bereitstellung eines schnellen und effizienten Datenzugriffs für eine große Nutzergruppe mit der Hilfe eines PLM-Systems erheblich verkürzt werden. Zusätzlich wird dieser Effekt noch durch die Verwendung eines geordneten Workflow-Managements unterstützt. So können Mitarbeiter durch den Einsatz eines PLM-Systems von administrativen Aufgaben, wie z.B. der Informationssuche, entlastet und somit Zeiteinsparungen bei den Planungsmitarbeitern zwischen 20 und 50 % realisiert werden (WEHLITZ 2000). Ein weiterer positiver Effekt besteht darin, dass der Zugriff auf frühere Arbeits-

ergebnisse über ein PLM-System relativ einfach gestaltet ist. Dies führt zu einer Steigerung der Produktivität sowie einer verstärkten Nutzung von Gleichteilen. PLM-Systeme verwalten sowohl Stamm- als auch Strukturdaten, wobei Stammdaten, wie z.B. physikalische Größen, d.h. Maße und Gewichte, eines Objektes, autark existieren und ohne weitere Beziehungen zu anderen Daten ein Merkmal darstellen. Strukturdaten hingegen repräsentieren Beziehungen zwischen verschiedenen Ausprägungen von Stammdaten, wie sie z.B. in Stücklisten vorliegen.

Das PLM hat sich aus der Notwendigkeit ergeben, die wachsende Anzahl digitaler CAD-Dokumente zu verwalten. So entstanden zunächst Zeichnungsverwaltungssysteme, die anfangs dateibasiert und später als Datenbankanwendung ausgestaltet waren. Diese wurden zu Komponenten eines technischen Informationssystems für das Daten- und Prozessmanagement in Entwicklung und Konstruktion weiterentwickelt (SCHÖTTNER 1999). Während die Entstehung von PLM-Systemen stark von der Produktentwicklung und der Verwaltung von vielfältigen Dokumenten geprägt war, geht die *Virtuelle Produktion* oder auch *Digitale Fabrik* auf produktionstechnische, stark von Simulationsmethoden geprägte Wurzeln zurück, die im folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

2.5.3 Virtuelle Produktion und Digitale Fabrik

REINHART et al. (1999) definieren die *Virtuelle Produktion* als die durchgängige, experimentierfähige Planung, Evaluierung und Steuerung von Produktionsprozessen und -anlagen mit Hilfe digitaler Modelle. Im Mittelpunkt dieses Ansatzes steht die Absicherung der Produkte und Produktionsprozesse ohne den Einsatz physischer Prototypen. Hierbei wird zwischen der vertikalen und der horizontalen Integration unterschieden. Die vertikale Integration ermöglicht eine gemeinsame Betrachtung auf den Hierarchie- und Abstraktionsebenen Fabrik, Anlage und Technologie, während bei der horizontalen Integration die Untersuchung von Prozessketten auf den genannten Abstraktionsebenen im Vordergrund steht. Im Zusammenhang mit der Virtuellen Produktion wird vielfach auch der Begriff *Digitale Fabrik* verwendet.

Laut REINHART (2003) beinhaltet die Digitale Fabrik die folgenden Methoden:

- Modellierung und Visualisierung
- Simulation und Bewertung
- Datenmanagement und Kommunikation

Die Digitale Fabrik verbessert nicht nur die Kommunikation, sondern beschleunigt auch die Lösungs- und Entscheidungsfindung sowie die Dokumentation der Planungsergebnisse. Sie ist die Summe der Methoden und Werkzeuge, mit denen, ausgehend von einem virtuellen Produktmodell, das z.B. als 3D-CAD-Geometrie vorliegt, die virtuelle Produktion aufgebaut werden kann. Die hierfür eingesetzten Werkzeuge sind in Abbildung 17 visualisiert. Sie orientieren sich stark an den Anforderungen der Prozesse in der Automobilindustrie, wie sie bereits in Abschnitt 2.2 vorgestellt wurden.

Die gleichzeitige Betrachtung von Produktionsprozessen und Produkt entspricht dem Grundgedanken der vorliegenden Arbeit einer integrierten, wissensbasierten Montageplanung für variantenreiche Produkte. Daher wird im Folgenden der Begriff der Digitalen Fabrik verwendet, um herauszustellen, dass der Fokus der Arbeit auf der Prozessplanung für die Montage und nicht auf der Absicherung von Anlagen oder Technologien, z.B. mit Hilfe von Simulationswerkzeugen, liegt. Abbildung 17 skizziert schematisiert den sequentiellen Einsatz der Werkzeuge der Digitalen Fabrik. Das für die Automobilindustrie typische Vorgehen des Simultaneous Engineerings erfordert jedoch in der Praxis einen parallelen Einsatz der dargestellten Werkzeuge. In der Planung werden überwiegend kreative Prozesse der Lösungssuche unterstützt, die sich teilweise gegenseitig beeinflussen, so dass die Werkzeuge über Iterationsschleifen miteinander verbunden sind. Um trotz der unterschiedlichen Versionsstände eine redundanzfreie Planung sicherzustellen, ist ein zentrales Datenmanagement zwischen den Werkzeugen notwendig.

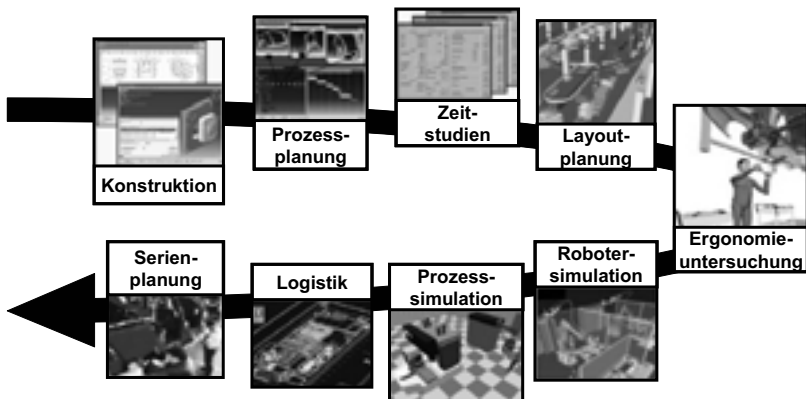


Abbildung 17: Werkzeuge der Digitalen Fabrik (nach BLEY et al. 2004)

Als wichtige Elemente hierfür haben sich das Produktdatenmanagement und die Prozessplanung in der frühen Phase etabliert. In die Prozessplanung werden zusätzlich Zeitstudien und weitere Werkzeuge meist über Schnittstellen eingebunden. Die sich hieraus ergebende Systemlandschaft ist in Abbildung 18 veranschaulicht. Pfeilpaare, die in entgegengesetzte Richtungen zeigen, verdeutlichen den bereits erläuterten iterativen Charakter der Planung. Hierbei können auch Ergebnisse der Feinplanung Änderungen auf einem höheren Abstraktionslevel in der Grobplanung notwendig machen und so einen erneuten Planungszyklus auslösen.

Während Systeme zur digitalen Montageplanung primär bei der Serienfertigung als Unterstützung des Simultaneous Engineering verwendet werden, kommen so genannte Computer Aided Process Planning-Systeme (CAPP-Systeme) vorwiegend in der Einzel- oder Kleinserienfertigung zum Einsatz. Da CAPP-Systeme eine deutlich längere Entwicklungsgeschichte als die Werkzeuge der Digitalen Fabrik aufweisen, wurde für sie eine Vielzahl von Planungsmethoden entwickelt, die sich in Ansätzen auch auf die Digitale Fabrik übertragen lassen. Aus diesem Grund werden im nächsten Abschnitt die Methoden und Ansätze von CAPP-Systemen dargestellt.

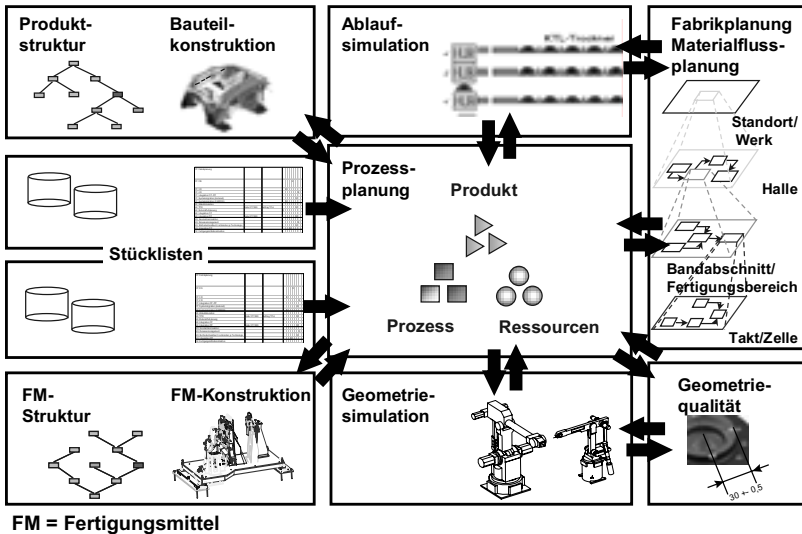


Abbildung 18: Systemlandschaft der Digitalen Fabrik (nach WIESMÜLLER 2002)

2.5.4 Computer Aided Process Planning

Computer Aided Process Planning (CAPP) ist eine häufig verwendete Bezeichnung für die computergestützte Arbeitsplanung mit dem Schwerpunkt auf der in Abschnitt 2.4.3 vorgestellten Arbeitsplanerstellung. Entsprechende Arbeitsplanungssysteme kommen vorrangig in Unternehmen des Maschinenbaus mit Einzel- und Kleinserienfertigung und einer variantenreichen Produkt- und Prozessstruktur zur Anwendung (HAMELMANN 1995). Die meisten Unternehmen, die ein eigenständiges Arbeitsplanungssystem einsetzen, erstellen jedes Jahr eine große Anzahl neuer Arbeitspläne und verfügen darüber hinaus über einen hohen Bestand an vorhandenen, sich wiederholenden Arbeitsplänen. CAPP-Systeme sind standardmäßig an ERP-Systeme angekoppelt (SCHÖTTNER 1999). Ähnlich wie PLM-Systeme, die Produktdaten und -dokumente verwalten und zu neuen Varianten zusammenstellen, generieren und verwalten CAPP-Systeme Fertigungs- und Ressourcendaten sowie produktspezifische Fertigungszeiten. Mit dem Einsatz von Arbeitsplanungssystemen verfolgen Unternehmen vielfältige Ziele (SCHULZ 1993), die, wie Abbildung 19 zeigt, den Bereichen Planungsdaten, Planungsausführung, Planungsablauf und Planungsergebnis zugeordnet werden können. Oftmals besteht eine große Unzufriedenheit in der Arbeitsvorbereitung mit bestehenden Daten, die aus einer unzureichenden Aktualität oder einer mangelhaften Konsistenz resultiert (BRACHT et al. 2005).

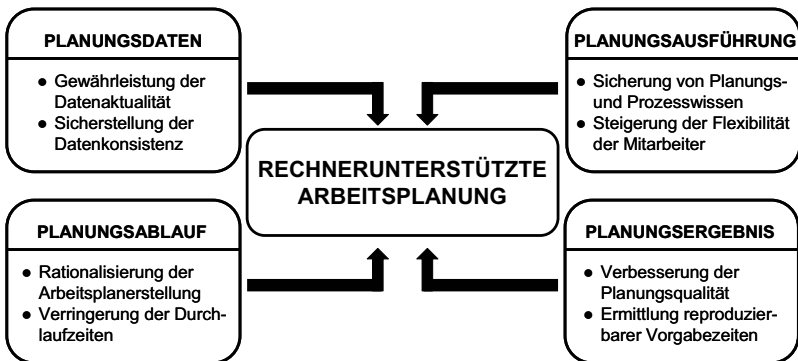


Abbildung 19: Ziele der Einführung eines Arbeitsplanungssystems (nach HAMELMANN 1995)

Dies ist insbesondere für Daten, die zur Zeitberechnung verwendet werden, als kritisch zu beurteilen. Ebenfalls mangelhaft dokumentiert wird in vielen Fällen das zur Ausführung der Planungen notwendige Methoden- und Prozesswissen. Wenn es gelingt, dieses Wissen mit Hilfe eines CAPP-Systems zu sichern, kann die Mitarbeiterflexibilität dadurch erhöht werden, dass Planer auch Vorgaben für Teilefamilien und Fertigungsverfahren erstellen können, die nicht unmittelbar in ihren speziellen Aufgabenbereich fallen (SCHULZ 1993, KOPNER 2002). Eng mit der Sicherung von Planungs- und Prozesswissen ist die Verbesserung von Planungsergebnissen verbunden, die sich in einer höheren Planungsqualität und einer besseren Reproduzierbarkeit von Vorgabezeiten ausdrückt. Hierfür ist es erforderlich, dass nicht nur frühere Planungsergebnisse, sondern auch das für ihre Erstellung eingesetzte Planungswissen berücksichtigt wird. Neben der Verbesserung der Planungsqualität wird mit dem Einsatz von CAPP-Systemen der vereinfachte Ablauf der Arbeitsplanerstellung angestrebt. Durch eine erhöhte Automatisierung kann eine Verringerung des Aufwandes bei der Erstellung von Arbeitsplänen und somit eine Verringerung der Durchlaufzeiten in der Arbeitsvorbereitung erreicht werden (SCHMIDT 1996).

Hierbei werden verschiedene Prinzipien zur Arbeitsplanerstellung unterstützt (CREMER 1992). Die beiden wichtigsten sind das Verwaltungs- und das Generierungsprinzip (HAMELMANN 1995).

Das *Verwaltungsprinzip* basiert auf dem Extrahieren, Editieren und Einfügen geeigneter Arbeitsgänge aus ähnlichen Arbeitsplänen in bzw. zu einem neuen Arbeitsplan. Dies setzt allerdings voraus, dass Arbeitspläne schnell und einfach gefunden werden können. Hierfür muss gewährleistet sein, dass auf eine klassifizierte Ablage der Dokumente oder die Methoden der künstlichen Intelligenz zurückgegriffen werden kann. Diese finden anhand von Ähnlichkeitsmaßen geeignete Arbeitspläne, die sich automatisiert oder manuell adaptieren lassen (CREMER 1992, GERKEN 2000).

Basierend auf einem Maximalarbeitsplan, der die Planungslogik und die Parameter für ähnliche Teile enthält, lässt sich im Gegensatz dazu beim *Generierungsprinzip* der Arbeitsplan automatisch durch die Eingabe von Einflussgrößen erstellen. Dieses Vorgehen ist jedoch nur für sehr ähnliche Bauteile durchführbar, da die einzelnen Bearbeitungsschritte fest vorgegeben und daher nur in Grenzen parametrisierbar sind. In den letzten Jahren haben sich hierfür so genannte wissensbasierte Arbeitsplangenerierungssysteme etablieren können (SCHÖTTNER 1999). Hierbei wird das gesamte betriebsspezifische Planungswissen in einem

Regelwerk abgebildet. Auf diese Weise kann die Erfahrung von Experten langfristig für ein Unternehmen gesichert werden (KOPNER 2002).

CAPP-Systeme wurden für eine Vielzahl von Fertigungs- und Montagetechnologien entwickelt. Ein deutlicher Schwerpunkt, der durch eine Vielzahl an Veröffentlichungen belegt wird, liegt auf der spannenden Bearbeitung (CREMER 1992, SCHULZ 1993, HAMELMANN 1995, ROY et al. 1995, YIP-HOI & DUTTA 1995, KAYACAN et al. 1996, SCHMIDT 1996, HUANG et al. 1997, JOO et al. 1997, LU et al. 1997, DEUSE 1998, YANG & LEE 1998, ZAHN 1999, AREZOO et al. 2000, CASE & HARUN 2000, GERKEN 2000, KIM et al. 2001, YANG et al. 2001, SOMASHEKAR 2002, MEHNERT 2004). Die Mehrzahl dieser Arbeiten beschäftigt sich mit der Integration von so genannten Features in einen generativen Planungsprozess.

Nach der VDI-RICHTLINIE 2218 (2003, S. 7) sind Features *„informationstechnische Elemente, die Bereiche von besonderem [technischen] Interesse von einzelnen oder mehreren Produkten darstellen. Ein Feature wird durch die Aggregation von Eigenschaften eines Produktes beschrieben. Die Beschreibung selbst beinhaltet die relevanten Eigenschaften, deren Wert sowie deren Relationen und Zwangsbedingungen [Constraints]. Ein Feature repräsentiert eine spezifische Sichtweise auf die Produktbeschreibung, die mit bestimmten Eigenschaftsklassen und bestimmten Phasen des Produktlebenszyklus zusammenhängt.“*

Das Planungsobjekt in den oben genannten Arbeiten ist meist ein einfaches drehend oder fräsend zu bearbeitendes Bauteil. In etwa dieser groben chronologischen Reihenfolge wurden mathematische Modelle, lineare Optimierung, Heuristiken, wissensbasierte Systeme und objektorientierte Wissensrepräsentationen als Lösungsansätze verwendet (ZAEH & RUDOLF 2003). Im Gegensatz hierzu existieren deutlich weniger Veröffentlichungen zur computergestützten Arbeitsplanung für andere Fertigungsverfahren (wie z.B. MAROPOULOS et al. 2000, LEI et al. 2001, MÁRKUS et al. 2002) oder die Montage (wie z.B. AMMER 1985, LAPERRIÈRE & ELMARAGHY 1996, ENG et al. 1999, BOWLAND et al. 2002, DAS & NAIK 2002).

Die vorgestellten Arbeiten geben nur einen Ausschnitt der gesamten Forschung im Bereich der Arbeitsplanung wieder. Einen Eindruck über die Vielzahl an Arbeiten vermitteln ZHANG & ALTING (1994), die bereits Anfang der neunziger Jahre die Existenz von mehr als 300 verschiedenen Prototypen dokumentiert haben. Trotz dieser großen Zahl an prototypischen, meist universitären Ansätzen

bleibt eine industrielle Umsetzung bisher hinter den Erwartungen zurück (ZAEH & RUDOLF 2003).

Viele Unternehmen nutzen einfache CAPP-Komponenten, die von ERP-Systemen, wie z.B. SAP R/3, als Modulelemente angeboten werden (siehe Abbildung 20). Bei diesen integrierten Lösungen wird meist nur das Verwaltungsprinzip durch Wiederauffinden und Editieren von Standardarbeitsplänen unterstützt (GÜNTNER et al. 2006b). Für komplexere Anforderungen sind zusätzliche Systeme notwendig, vor deren Anwendung aber viele Unternehmen zurückschrecken, da sie in die bestehenden Systemwelten integriert werden müssen. Frühe Systeme in diesem Bereich nutzten überwiegend die Methode der Entscheidungstabellen, während neuere Ansätze vielfältige Methoden der Wissensrepräsentation einsetzen, die in Abschnitt 2.6 näher erläutert werden.

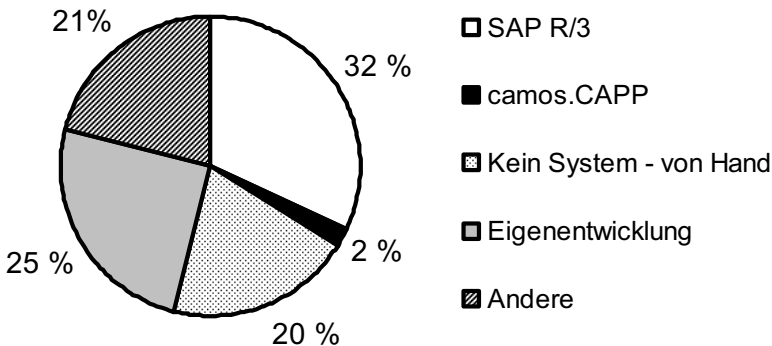


Abbildung 20: Ergebnisse einer Studie der Universität Hannover zu EDV-Systemen in der Arbeitsplanung, an der 75 deutsche Unternehmen aus den Bereichen Automobilbau sowie Maschinen- und Anlagenbau teilgenommen haben (nach DRABOW & WOELK 2004)

2.6 Wissensbasierte Systeme

2.6.1 Allgemeines

Abbildung 21 veranschaulicht, dass Wissen auf sehr unterschiedliche Art wiedergegeben werden kann. Im Folgenden wird zunächst kurz auf die dargestellten Formen der Wissensrepräsentation eingegangen. Eine detaillierte Erläuterung regelbasierter, objektorientierter und constraintbasierter Ansätze erfolgt in Abschnitt 2.6.2.

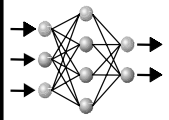


		Formen der Wissensrepräsentation	
Prozedurale Sprachen	Imperativ	$2 + 3 + 4$	
	Funktional	$(+ 2 3 4)$	
Nicht-prozedurale Sprachen	Nicht-deklarativ	Induktionsbasiert	
		Constraintbasiert	
	Deklarativ	Regelbasiert	<code>(defrule duck "Here comes the quack" (animal-is duck) => (assert (sound-is quack)))</code>
		Logik	<code>adjacent(2,3). ? - adjacent(2,3). yes</code>
		Objektorientiert	

Abbildung 21: Formen der Wissensrepräsentation (eigene Darstellung in Anlehnung an HAMELMANN 1995)

Eine grundsätzliche Unterscheidung bei der Form der Wissensrepräsentation stellt die Einteilung in prozedurale und nicht-prozedurale Sprachen dar (siehe Abbildung 21). Nach BULLINGER et al. (1989) ist prozedurales Wissen durch die Beschreibung von Abläufen gekennzeichnet, während bei nicht-prozeduralen Sprachen die einzelnen Elemente und deren Beziehungen zueinander im Vordergrund stehen.

Die Vermengung von anwendungsspezifischem Wissen mit allgemeinem Problemlösungswissen erschwert es in prozeduralen Systemen, das eingebrachte Fachwissen nachträglich zu verändern, da hierfür ein direkter Eingriff in den Programmcode notwendig wäre. Im Gegensatz hierzu besteht bei nicht-prozeduralen Systemen eine deutliche Trennung zwischen anwendungsbezogenem Fachwissen und unabhängigem Problemlösungswissen. Getrennt vom Anwendungswissen ist allgemeines, anwendungsunabhängiges Wissen, wie z.B. die Mechanismen zum Ziehen von Schlüssen, in der Problemlösungskomponente enthalten. Durch diese Trennung ist es möglich, Wissen explizit in einer Programmlogik abzubilden. Dies verursacht zwar einen höheren Initialaufwand für die Erstellung derartiger Systeme, verbessert allerdings die Wartbarkeit erheblich. Durch das Ablegen des fallspezifischen Fachwissens innerhalb einer abgeschlossenen Wissensbasis wird es austausch-, erweiter- und modifizierbar, ohne dass der Programmcode verändert werden muss.

Nicht-prozedurale Sprachen werden in nicht-deklarative und deklarative Ansätze eingeteilt. Nicht-deklarative Ansätze, wie z.B. neuronale Netze, werden eingesetzt, wenn ein Rechner durch einige wenige ausgewählte Eingabemuster lernen soll, ein beliebiges Eingabemuster in das gewünschte Ausgabemuster zu überführen (KOPNER 2002). Im Gegensatz zu deklarativen Ansätzen basieren sie auf einer Fallbasis und erklären nicht explizit bzw. nicht für den Anwender nachvollziehbar, wie sie zu Ergebnissen gelangen (ADAMY 2005). Deklarative Ansätze sind dadurch gekennzeichnet, dass Fakten und deren Beziehungen abgebildet werden, um auf dieser Grundlage zu Ergebnissen zu gelangen (MERTENS 1990). Im Folgenden werden wissensbasierte Systeme vorgestellt, welche verschiedene deklarative Repräsentationsformen in sich vereinen. KURBEL (1992, S.18) definiert ein wissensbasiertes System als „[...] ein Softwaresystem, bei dem das Fachwissen über das Anwendungsgebiet (Domain Knowledge) explizit und unabhängig vom allgemeinen Problemlösungswissen dargestellt wird“.

Auf den Unterschied zwischen implizitem, d.h. nicht dokumentiertem und nicht zugänglichem, und explizitem, d.h. dokumentiertem und zugänglichem, Wissen

soll nur im Zusammenhang mit wissensbasierten Systemen eingegangen werden. GOTTLÖB et al. (1990) beschreiben ihn wie folgt:

- Implizites Wissen steht im Code eines Programms. Ein Algorithmus wird nicht abgearbeitet, weil das System eine Methode gesucht hat, sondern weil der Programmierer festgelegt hat, dass ein Algorithmus an einer bestimmten Stelle auszuführen ist. Hiermit ist das Wissen direkt im Programmcode enthalten.
- Explizites Wissen ist in bestimmten Teilen des Systems lokalisierbar. Wird Wissen explizit in einem Programm gespeichert, so sind dem System seine Problemlösungsmöglichkeiten für eine bestimmte Aufgabe bekannt und es kann diese je nach Bedarfsfall entsprechend anwenden.

Das allgemeine, anwendungsunabhängige Wissen, z.B. in Form der Mechanismen, wie aus bestimmten Voraussetzungen Schlüsse gezogen werden können, ist in der Problemlösungskomponente enthalten. Sie nimmt die Auswertung bzw. Verarbeitung des in der Wissensbasis enthaltenen Fachwissens vor und wird daher auch als Inferenzmaschine bezeichnet (KURBEL 1992). Für weitere Einzelheiten über den Aufbau wissensbasierter Systeme sei auf KURBEL (1992), PUPPE (1991) und VDI-EKV (1992) verwiesen. Synonym zu wissensbasierten Systemen wird auch häufig der Begriff der *Expertensysteme* verwendet. Oftmals werden Expertensysteme aber auch als Teilmenge der wissensbasierten Systeme bezeichnet, die Expertenwissen auf Problemstellungen aus der realen Welt anwenden (KURBEL 1992). Mit der Bezeichnung „wissensbasiert“ wird die softwaretechnische Struktur des Systems mit ihrer expliziten Darstellung des anwendungsspezifischen Wissens in einer Wissensbasis ausgedrückt. Da diese für die Methode der Arbeit entscheidend ist, wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit der Begriff „wissensbasierte Systeme“ synonym für Expertensysteme verwendet.

Charakteristische Eigenschaften dieser Systeme sind nach PUPPE (1991):

- **Transparenz**
Wissensbasierte Systeme können ihre Problemlösung durch Angabe des benutzten Wissens erklären.
- **Flexibilität**
Es ist möglich, einzelne Wissensstücke relativ leicht hinzuzufügen, zu verändern oder zu löschen.
- **Benutzerfreundlichkeit**
Der Umgang mit wissensbasierten Systemen erfordert kein programmiersprachliches Vorwissen.

- **Kompetenz**

Wissensbasierte Systeme verfügen über eine hohe Problemlösungsfähigkeit in ihrem Anwendungsbereich.

Eine Besonderheit wissensbasierter Systeme besteht in der Verwendung von so genanntem Beziehungswissen, das Abhängigkeiten zwischen Objekten und Merkmalen beschreibt. Die Besonderheit der hierbei primär eingesetzten deklarativen Wissensrepräsentation liegt darin, dass der Auswertungszeitpunkt sowie die Auswertungsreihenfolge keine Rolle spielen (KOHLHOFF 2005). Das Ergebnis lässt sich aufgrund des hinterlegten Beziehungswissens immer logisch erklären. Im Gegensatz dazu hängt das Ergebnis von prozeduralen Beziehungen von der Reihenfolge und dem Auswertungszeitpunkt ab. Im nächsten Abschnitt werden Repräsentationsformen behandelt, die dem deklarativen Beziehungswissen zuzuordnen sind.

2.6.2 Repräsentationsformen zur Abbildung von Wissen

2.6.2.1 Allgemeines

Für die Darstellung von Wissen existieren verschiedene Repräsentationsformen (PUPPE 1991, VDI-EKV 1992, ZAEH & RUDOLF 2003). Die für diese Arbeit wichtigsten Repräsentationsformen sind:

- regelbasiert
- objektorientiert
- constraintbasiert

2.6.2.2 Regelbasierte Wissensrepräsentation

Regelbasierte Systeme waren die erste Generation wissensbasierter Systeme, die Ende der siebziger Jahre in den USA entwickelt wurden (PULS 2003). Sie funktionieren nach einem fest definierten Schema: Wenn eine Bedingung erfüllt ist, wird eine Regel aktiv und veranlasst die Ausführung einer Aktion. Solche WENN-DANN-Konstrukte werden zwar auch in klassischen prozeduralen IF-THEN-ELSE-Anweisungen eingesetzt, der Hauptunterschied liegt aber in zwei spezifischen Fähigkeiten der regelbasierten Systeme begründet (VDI-EKV 1992):

- dem selbstständigen Suchen nach weiteren Regeln, wenn eine einzige nicht ausreicht oder in der Bedingung einer Regel unbekannte Fakten enthalten sind, die mit Hilfe anderer Regeln verifiziert werden können (Verarbeitung der Regel)
- dem flexiblen Einsatz ohne feste Verankerung im Quellcode eines Programms (explizite Wissensrepräsentation)

Der wesentliche Vorteil von Regeln im Gegensatz zu prozeduralem Programmcode liegt in der Ähnlichkeit zu menschlichen Denkweisen. Daher fällt es vielen Experten und Programmierern leicht, ihr Wissen in dieser Art auszudrücken und in rechnerinternen Strukturen abzubilden. Demgegenüber sind die mangelnde Transparenz und der schwer verständliche Kontrollfluss Hindernisse für den Einsatz rein regelbasierter Systeme (GÜNTER et al. 1999).

Eine Möglichkeit, Regeln übersichtlich abzubilden, bieten Entscheidungstabellen. Diese Methode wurde erstmals 1958 von der amerikanischen Firma General Electric Company eingesetzt und im Jahre 1979 in der DIN 66241 normiert (DIN 66241 1979, PULS 2003). Eine Entscheidungstabelle ist ein tabellarisches Beschreibungsmittel für formalisierte Entscheidungsprozesse, das angibt, welche Bedingungen erfüllt sein müssen, damit eine bestimmte Aktion ausgeführt wird. Durch ihre Einteilung in vier Quadranten (siehe Abbildung 22) wird eine übersichtliche Darstellungsform erzielt:

- Bedingungen (links oben),
- Aktionen (links unten),
- Bedingungsanzeiger (rechts oben) und
- Aktionsanzeiger (rechts unten)

		Bedingungsanzeiger	
		Regel 1	Regel 2
Bedingung 1	Durchmesser	≤ 10	> 10 und ≤ 50
Bedingung 2	Werkstoff	-	"AL"
Aktion 1	Vorbohren	N	J
Aktion 2	Bohrerdurchmesser	-	$0,5 * \text{Durchmesser}$
Aktion 3	Durchmesser	Durchmesser	Durchmesser
Aktion 4	tr	0,5	0,5
Aktion 5	te	$\text{Durchmesser} * 0,2$	$\text{Durchmesser} * 0,2$
Aktion 6	Maschine	1608	1609
Aktion 7	Maschinengruppe	5102	5103

Abbildung 22: Beispiel einer Entscheidungstabelle (eigene Darstellung in Anlehnung an DIN 66241 1979 und THALER 1993)

In einer Regel wird festgelegt, unter welchen Voraussetzungen bestimmte Maßnahmen zu ergreifen sind. Jede Spalte entspricht einer Regel, wie aus Abbildung 22 hervorgeht. Die Abarbeitung von Entscheidungstabellen durch die Inferenzmaschine erfolgt von links nach rechts. Dies bedeutet, dass diejenigen Aktionen gewählt werden, deren sämtliche Bedingungen als erste mit „wahr“ ausgewertet werden. Die Bedingungen innerhalb der Spalten sind mit einem UND verknüpft, d.h. die darin enthaltenen Bedingungen müssen alle zutreffen. Zwischen den Spalten liegt aufgrund des sequentiellen Abarbeitens der einzelnen Spalten ein exklusives ODER vor, so dass zu einem gegebenen Zeitpunkt immer nur genau eine Regel zutreffen kann. Eine Schwierigkeit bei der Erstellung von Entscheidungstabellen stellt die Vermeidung von Redundanz, Fehlerhaftigkeit und widersprüchlichen Regeln dar. Dies gestaltet sich mit zunehmender Größe jedoch als schwierig (LI 2003, PULS 2003):

- Redundanz tritt ein, wenn mehr Regeln als erforderlich vorhanden sind. Sie lässt sich daran erkennen, dass zwischen zwei Regeln alle Bedingungen bis auf eine gleich sind, da alternativ die zweite Regel auch mit einer allgemeinen ELSE-Regel am äußeren, rechten Rand der Entscheidungstabelle abgebildet werden kann.
- Fehlerhaftigkeit liegt vor, wenn sich in einer Situation zwei passende Regeln finden.
- Widersprüchlichkeit ist gegeben, wenn in einer Situation zwei passende Regeln vorliegen und diese zu verschiedenen Aktionen führen.

Die mit der Anzahl der Bedingungen in der Größenordnung 2^n anwachsende Anzahl von Regeln führt häufig zu einer unübersichtlichen Größe von Entscheidungstabellen. Die notwendige Menge von Regeln kann durch das Verknüpfen von Entscheidungstabellen reduziert werden. Hierbei sind verschiedene Verknüpfungsformen möglich:

- Sequenz: Die zweite Entscheidungstabelle folgt direkt der ersten.
- Verzweigung: Es können mehrere Entscheidungstabellen, abhängig von den Bedingungen in der ersten Tabelle, unmittelbar folgen.
- Schleife: Mindestens eine Regel führt zur erneuten Anwendung der Entscheidungstabelle.
- Schachtelung: Zur Prüfung einer Bedingung oder bei Ausführung einer Tätigkeit wird eine zweite Tabelle angewandt.

Diese Verknüpfungsformen erlauben, einen Entscheidungsprozess effizienter abzubilden, erschweren allerdings das Verständnis der Regelabläufe und damit die Wartbarkeit des Systems (VDI-EKV 1992).

2.6.2.3 Objektorientierte Wissensrepräsentation

In vielen modernen wissensbasierten Systemen kommen objektorientierte Ansätze, die auch als Begriffshierarchien bezeichnet werden, zur Anwendung (GÜNTER & KÜHN 1999). Es handelt sich hierbei um eine erweiterte Form der UND/ODER-Grafen, die eine Kombination von *Partonomie* und *Taxonomie* abbilden können. *Taxonomien* dienen zur Klassifikation von Objekten (siehe Abbildung 23).

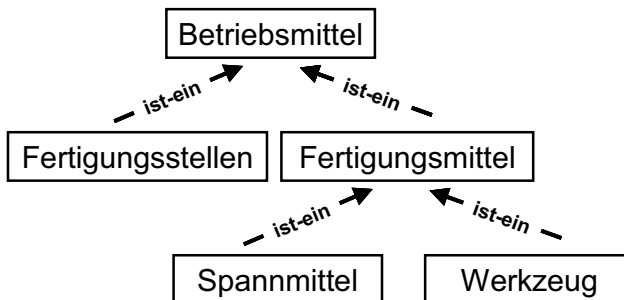


Abbildung 23: Beispiel einer Taxonomie (nach HAMELMANN 1995)

Sie stellen eine hierarchische Gliederung dar, bei welcher der Begriffsinhalt des engeren Begriffs (Unterbegriff) den Begriffsinhalt des oberen Begriffs (Oberbegriff) einschließt. Hierbei unterscheidet sich der Unterbegriff durch mindestens eine zusätzliche Eigenschaft vom Oberbegriff (PULS 2003). Weitere hierfür verwendete Begriffe sind der ODER-Baum, die IST-EIN- oder die Spezialisierungshierarchie.

Partonomen entsprechen der gedanklichen Zerlegung eines Ganzen in seine Bestandteile, z.B. eines Produktes in seine Komponenten. Sie werden auch häufig als HAT-TEIL- bzw. IST-TEIL-VON-Hierarchien bezeichnet. Da die Knoten jeweils eine UND-Verknüpfung mit den folgenden Elementen beinhalten, werden sie auch als UND-Bäume bezeichnet. Die Produktstruktur ist z.B. eine Partonomie, welche die Bestandsbeziehungen der Einzelteile und Baugruppen technischer Produkte sowie deren mengenmäßige Aufteilung beschreibt (KÖHLHASE 1996). Wie Abbildung 24 zeigt, stellt die Produktstruktur die Zusammensetzung eines Erzeugnisses, bestehend aus Teilelementen und deren Beziehungen, dar.

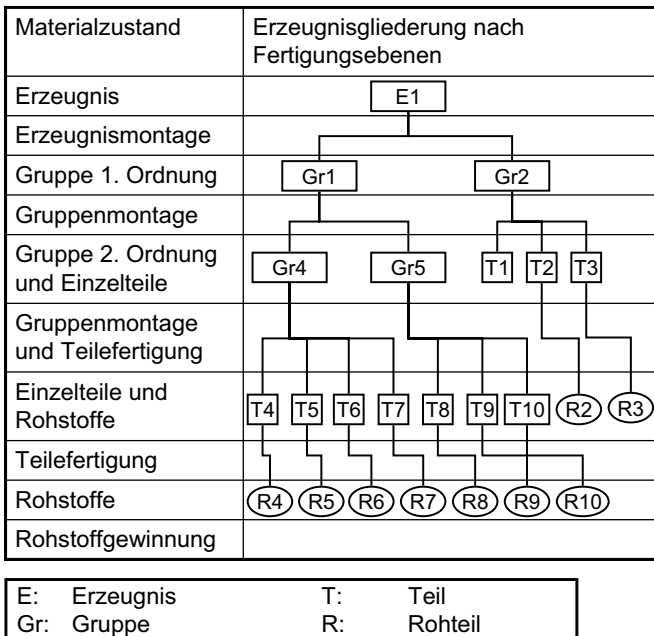


Abbildung 24: Beispiel einer Partonomie (nach REFA 1992)

Die Objekte werden mit Parametern und Wertevorgaben definiert und in einer partonomischen Hierarchie strukturiert. Diese bestimmt, welche Objekte für eine bestimmte Aufgabe oder einen bestimmten Platz zur Verfügung stehen (PULS 2003).

2.6.2.4 Constraintbasierte Wissensrepräsentation

Constraints (engl.: Einschränkungen) dienen zur Repräsentation und Auswertung von Beziehungen zwischen Objekten und deren Attributen. Sie stellen eine deklarative Beziehungsart dar, die direkte Abhängigkeiten wechselseitig zwischen mindestens zwei Komponenten oder Merkmalen ausdrückt. Im Unterschied zu Regeln, die gerichtete Zusammenhänge repräsentieren, drücken Constraints ungerichtete Zusammenhänge aus, die normalerweise nach jeder Variablen aufgelöst werden können (siehe Abbildung 25). Dieser Mechanismus ist sehr effizient und übersichtlich, um wechselseitige Beziehungen zwischen Komponenten und Merkmalen abzubilden. Aus diesem Grund findet die constraintbasierte Wissensrepräsentation in vielen kommerziellen Systemen, wie z.B. den Produktkonfiguratoren, Anwendung (GÜNTER & KÜHN 1999, KOHLHOFF 2005). Mit Hilfe von Constraints werden bestimmte Variantenkombinationen explizit ausgeschlossen. Der wesentliche Unterschied zu Regeln besteht darin, dass keine Aktionen, z.B. in Form einer Wertzuweisung, definiert werden. Dies bedeutet, dass Komponenten normalerweise nicht über Constraints automatisch ausgewählt werden, sondern lediglich die Lösungssuche eingeschränkt wird. Um beide Vorgehensweisen zu ermöglichen, sind in vielen Systemen die unterschiedlichen Methoden von Regeln und Constraints miteinander kombiniert: Die Wertbestimmung von Komponenten oder Merkmalen erfolgt z.B. durch Regelzuweisungen, während Constraints zur Konsistenzsicherung eingesetzt werden.

<p style="text-align: center;"><u>Beispiel für eine Regel</u></p> <p style="text-align: center;">$A \Rightarrow B$ „Wenn A dann gilt B“</p> <p style="text-align: center;">Es lässt sich keine Aussage aus der Gültigkeit von B auf die Gültigkeit von A herleiten.</p> <p style="text-align: center;"><u>Beispiel für ein Constraint</u></p> <p style="text-align: center;">$U = R \cdot I$</p> <p style="text-align: center;">Wenn zwei beliebige Variablen bekannt sind, kann die dritte Variable bestimmt werden.</p>

Abbildung 25: Zusammenhang der Variablen bei Regeln und Constraints
(eigene Darstellung in Anlehnung an GÖRZ 1995)

3 Stand der Forschung und Technik

3.1 Allgemeines

In Abhängigkeit von der Fertigungsart sind heute in den Unternehmen unterschiedliche Ansätze zur Montageplanung vorzufinden. In der Einzel- und Kleinserienfertigung herrscht überwiegend eine werkstatorientierte Fertigung vor, die durch universelle Maschinen und Anlagen geprägt ist. Die Montageplanung wird hier in der Regel durch einen kundenspezifischen Auftrag, wie er beispielsweise im Sondermaschinenbau üblich ist, gestartet. In diesem Fall wird nicht die Layoutanordnung der Fertigungsstätte oder die Beschaffung neuer Betriebsmittel geplant, sondern meist mit einer gegebenen Ressourcenstruktur eine optimale Reihenfolge und Maschinenzuordnung mit entsprechenden Zeitvorgaben erstellt. Aus diesem Grund beschränkt sich bei einer derartigen Produktion die Planung auf den Montageablauf (ESCH 1985, HAMELMANN 1995). Im Gegensatz dazu sind bei Serienfertigern, wie z.B. auch die Automobilindustrie, die zumeist Produkte, Montageabläufe und Montagesysteme überlappend planen, eine Vielzahl von Zusammenhängen und Abhängigkeiten zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen zu beachten (THALER 1993, FELDMANN 1997, CUIPER 2000, GERKEN 2000, JONAS 2000). Hier zeigt sich die Notwendigkeit, neben dem Montageablauf auch das Montagesystem in den Planungsprozess zu integrieren.

Arbeiten, die den Schwerpunkt auf die reine Ablaufplanung legen, stammen überwiegend aus den frühen neunziger Jahren. Aufgrund der damaligen hohen Erwartungshaltung an wissensbasierte Methoden wurden diese auch in einer Vielzahl arbeitsplanerischer Aufgabengebiete eingesetzt. Aktuelle Entwicklungen im Umfeld der Digitalen Fabrik haben bisher diese Ansätze noch nicht aufgegriffen, obwohl insbesondere in der Variantenplanung ein Schwachpunkt bestehender Lösungen liegt (BLEY et al. 2005) und gerade dort die Stärken wissensbasierter Methoden zum Tragen kommen (KOHLHOFF 2005).

Heute sind Methoden wissensbasierter Systeme ein fester Bestandteil in vielen IT-Systemen sowohl im Produktentwicklungsprozess als auch im Vertrieb. Die Ausführung der Funktionalität dieser Systeme erfolgt allerdings oftmals im Hintergrund und wird deshalb nicht explizit wahrgenommen. Anwendungsunabhängig werden diese Methoden in den meisten Fällen genutzt, um Komplexität, die durch Variantenvielfalt entsteht, beherrschbar zu machen. In den folgenden

Abschnitten werden wissensbasierte Systeme mit ihren Anwendungsfällen in Konfiguration und Planung vorgestellt. Hierbei liegt der Schwerpunkt allgemein auf dem Einsatz wissensbasierter Methoden und nicht speziell auf deren Anwendung in der Automobilindustrie. Im Anschluss daran wird der Stand der Technik im Bereich der Digitalen Fabrik aufgezeigt, die speziell für die Anforderungen der Automobilindustrie ausgelegt wurde, um darauf aufbauend notwendige Handlungsfelder abzuleiten.

3.2 Einsatz wissensbasierter Methoden in Systemen der Produkt- und Prozessplanung

3.2.1 Allgemeines

Wissensbasierte Systeme können sowohl für analytische als auch für synthetische Aufgabentypen verwendet werden. Abhängig von der jeweiligen Problemstellung ergeben sich, wie Abbildung 26 zeigt, unterschiedliche Grade möglicher Systemunterstützung.

Der Aufgabentyp hat eine starke Auswirkung auf die Art des geeigneten Schlussfolgerungsmechanismus, bei dem zwischen Vorwärts- und Rückwärtsverkettung unterschieden wird (PUPPE 1991). Bei der Vorwärtsverkettung wird auf der Grundlage gegebener Fakten eine Schlussfolgerung gezogen. Typische Anwendungsfälle sind Konfigurationssysteme, bei denen auf der Basis definierter Kundenwünsche Schlüsse auf ein entsprechendes Produkt gezogen werden. Bei einer Rückwärtsverkettung ist der Ausgangspunkt die Frage, wie es zu einem bestimmten Zustand kommen konnte. Als Beispiel hierfür können die im medizinischen Bereich eingesetzten Diagnosesysteme angeführt werden (MERTENS 1990, PUPPE 1991). Die in Abschnitt 2.4 beschriebene Aufgabe der Montageplanung entspricht am ehesten den Aufgabentypen der Konfiguration und Planung, bei denen abhängig von den gegebenen Anforderungen und Randbedingungen eine geeignete Lösung ermittelt wird. Es handelt sich also hierbei um eine Vorwärtsverkettung. Die Begriffe *Konfiguration* und *Planung* stehen in einem engen Zusammenhang und sollen zum besseren Verständnis im Rahmen dieser Arbeit gegeneinander abgegrenzt werden.

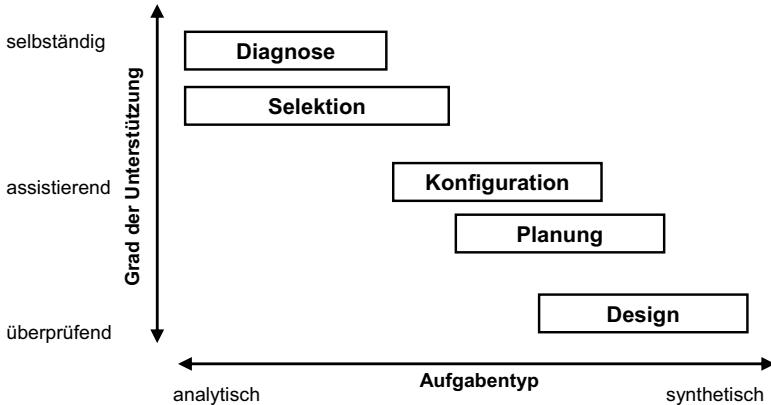


Abbildung 26: Aufgabentypen und Unterstützung durch wissensbasierte Systeme
(nach HINKELMANN 1995)

Die *Konfiguration* bezeichnet einen Syntheseprozess, bei dem die Aufgabenstellung im Wesentlichen durch Kombinieren und Anordnen bekannter Elemente gelöst wird. Diese Elemente, aus denen die Lösung zusammengesetzt wird, sind selbst fertige technische Produkte oder Systeme, so dass die Konfiguration weitestgehend aus der Kombination, der Auswahl und der Anpassung geeigneter Elemente besteht (VDI-EKV 1992). Die Abbildung des Beziehungswissens zwischen den verschiedenen Objekten wird mit Technologien und Systemen aus dem Umfeld wissensbasierter Systeme unterstützt.

Auch der Begriff *Planung* bezeichnet eine Synthesetätigkeit, die mit dem Konfigurieren eng verwandt ist. Über eine bloße Konfiguration aus bestehenden Elementen hinausgehend, beinhaltet die Planung allerdings kreative Elemente der Lösungssuche, die überwiegend vom Menschen zu leisten ist. Aus diesem Grund ändert sich der Charakter der Systemunterstützung in Richtung einer Überprüfung der vom Menschen erstellten Lösung (HINKELMANN 1995).

Konfiguration	
Definition des zur Konfiguration notwendigen Wissens	• Beschreibung von Objekten und deren Eigenschaften
	• Relationen/Restriktionen zwischen den Objekten
	• Wissen über die Vorgehensweise (Kontrollwissen)
Konfigurationsvorgang	• Aufgabenspezifikation

Abbildung 27: Definition des Konfigurierens (nach GÜNTER et al. 1999)

Aufgrund der Ähnlichkeit der Aufgabentypen *Planung* und *Konfiguration* kann nach Abbildung 27 auf Voraussetzungen geschlossen werden, die für eine erfolgreiche Systemanwendung bei Planungsaufgaben notwendig sind (GÜNTER & KÜHN 1999):

- Es muss eine Spezifikation der Aufgabe (Konfigurations- und Planungsziele) mit Angaben über deren Anforderungen erarbeitet werden.
- Hierfür müssen eine Menge von Objekten der Anwendungsdomäne (Domänenobjekte) und deren Eigenschaften (Parameter) beschrieben werden.
- Es gilt weiterhin, die Menge von Relationen und Restriktionen zwischen den Objekten, abzubilden.
- Zusätzlich muss Wissen (Kontrollwissen) über die Vorgehensweise bei der Konfiguration (Lösungssteuerung) hinterlegt werden.

Im Folgenden wird der Einsatz wissensbasierter Methoden zur Bearbeitung von Planungsaufgaben des Produktentstehungsprozesses detailliert anhand ausgewählter Informationssysteme vorgestellt.

Wissensbasierte Methoden kommen in einer Vielzahl von Systemen im Produktentstehungs- und im Vertriebsprozess zum Einsatz. Sie sind auf ein bekanntes Arbeitsgebiet eingeschränkt und ermöglichen durch diese Komplexitätsreduktion einen erfolgreichen Einsatz (TROPSCHUH 1989). Für eine umfassende Darstellung der Beherrschung der Variantenvielfalt im Vertriebsprozess sei auf LI (2003) und PULS (2003) verwiesen. Ebenfalls von großer Bedeutung sind wissensbasierte Methoden in modernen CAD-Systemen, wie sie von JANITZA (2004) umfassend dargestellt werden. Als Grundlage für diese Arbeit werden wissensba-

sierte Anwendungen in PLM- und CAPP-Systemen aufgezeigt, da diese Systemwelten der Prozessplanung der Digitalen Fabrik, dem Fokus dieser Arbeit, unmittelbar vor- beziehungsweise nachgelagert sind. Ähnlich wie die Digitale Fabrik unterstützen sie einen Entwicklungsprozess, der über eine reine Konfiguration bekannter Elemente hinausgeht.

3.2.2 PLM-Systeme

Das PLM als Erweiterung des PDM entstand, wie bereits in Abschnitt 2.5.2 dargestellt, durch die Anforderung, die steigende Anzahl digitaler CAD-Zeichnungen zu verwalten. Mit einer zunehmenden Leistungsfähigkeit der Systeme wurden sie um die Funktion des Teilemanagements für Norm- und Standardteile erweitert. Nach dem Aufbau einer standardisierten Bibliothek auf der Teile- und Baugruppenebene können PLM-Systeme zur Unterstützung der Variantenkongfiguration genutzt werden. Hierfür müssen sie zu einem Produktbaukasten ausgebaut werden, der die Produktpalette durch Produktstrukturen repräsentiert (SCHÖTTNER 1999). In diesem werden alle sinnvollen und notwendigen Kombinationsmöglichkeiten erfasst und in einer geeigneten Form abgebildet. Voraussetzung hierfür ist eine hierarchische Strukturierung, die um Alternativ- und Optionalkomponenten zu ergänzen ist (siehe Abbildung 28). Alternativbausteine erfordern für ihre Einbindung so genannte Pflegeobjekte, über die sie später selektiert werden. Eine Zuordnung von Alternativbaugruppen über eine Entscheidungstabelle ist beispielhaft in Abbildung 28 anhand des Objektes R1 veranschaulicht.

Ähnlich kann dies für Optionalkomponenten durchgeführt werden. Die Logik dieser Regelobjekte wird entweder manuell oder systemgesteuert realisiert (SCHÖTTNER 1999, EIGNER & STELZER 2001). Selbst bei einer manuellen Auswahl kommen wissensbasierte Ansätze zum Einsatz. Hier liegt der Schwerpunkt auf der Überprüfung, ob die Zusammenstellung technisch korrekt ist. Das hierfür notwendige Beziehungswissen kann mit Methoden wissensbasierter Systeme direkt in PLM-Systemen abgebildet werden. Wie in Abschnitt 2.6.2 erläutert wurde, existiert für die Wissensabbildung eine Vielzahl möglicher Methoden. In komplexen Systemen ist es notwendig, diese unterschiedlich in Abhängigkeit der spezifischen Anforderungen einzusetzen.

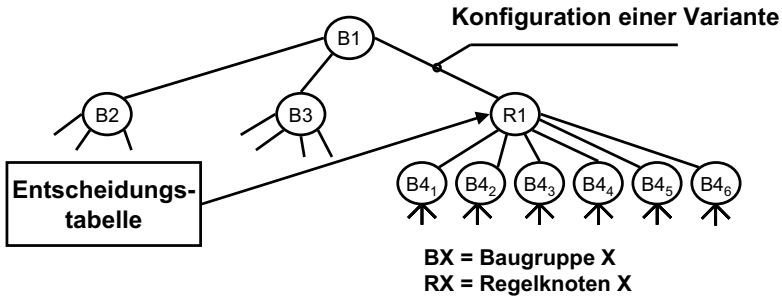


Tabelle R1	R01	R02	R03	R04	R05	R06	
B01	Medium	Gas	Gas	Flüssigkeit	Flüssigkeit	Flüssigkeit	
B02	Durchsatz	<= 1	<= 2	<= 5	<= 0,5	<= 1	<= 2
A01	Baugruppe	B4 ₁	B4 ₂	B4 ₃	B4 ₄	B4 ₅	B4 ₆

B0X = Bedingung X
A0X = Aktion X
R0X = Regel X

Abbildung 28: Anwendung von Entscheidungstabellen in PLM-Systemen (eigene Darstellung in Anlehnung an SCHÖTTNER 1999)

So finden sich zum Beispiel im ERP-System der Firma SAP Deutschland AG & Co. KG (SAP R/3[®]) drei verschiedene Beziehungswissensarten (KOHLEHOFF 2005):

- Vorbedingungen
- Auswahlbedingungen
- Constraints

Die *Vorbedingungen* sind der regelbasierten Wissensrepräsentation zuzuordnen. Sie dienen dazu, unzulässige Merkmale oder Merkmalswerte auszublenden, um so sicherzustellen, dass nur konsistente Konfigurationen möglich sind. Des Weiteren schränken sie Auswahlmöglichkeiten ein, ohne jedoch explizit Werte zu setzen.

Auswahlbedingungen werden verwendet, um zu gewährleisten, dass alle für eine Variante relevanten Objekte ausgewählt werden. Sie legen somit fest, zwischen welchen verschiedenen Komponenten aus der Variantenstückliste ausgewählt werden kann bzw. aus welchen mindestens eine gewählt werden muss. Wie aus Abbildung 28 hervorgeht, sind Auswahlbedingungen in Form von Entscheidungstabellen (siehe R1) direkt den Stücklistenpositionen zugeordnet. Eine

Aktion, wie z.B. die Auswahl einer spezifischen Baugruppe, wird auf der Basis einer Entscheidungstabelle durchgeführt, wenn alle ihr zugeordneten Bedingungen erfüllt sind.

Constraints werden vor allem für Konfigurationsaufgaben verwendet, in denen Abhängigkeiten zwischen Merkmalen mehrerer Objekte abzubilden sind. Ihre Hauptaufgabe liegt, wie in Abschnitt 2.6.2 beschrieben, nicht in einer direkten Wertzuweisung, sondern in der Überwachung der Konsistenz von Konfigurationen.

3.2.3 CAPP-Systeme

Erste Forschungsergebnisse im Bereich von CAPP-Systemen stammen aus den sechziger Jahren. Grundlagen hierfür sind Klassifizierungsmethoden wie der Opitz- oder der Wiendahl-Schlüssel (OPITZ 1966, 1971, WIENDAHL & HEUWING 1973). Die Zielsetzung beider Methoden ist die Rationalisierung der Auftragsabwicklung durch die Wiederverwendung vorhandener, zu einem früheren Zeitpunkt erstellter Unterlagen. Auf diese Weise lassen sich Einsparungen an Arbeitsplänen, Vorrichtungen, Werkzeugen sowie an Lagerhaltungskosten realisieren. Hierzu werden Bauteil- oder Baugruppenmerkmale in einen numerischen Schlüssel umgesetzt. Neben dem kurzfristigen Effekt der Wiederverwendung vorhandener Unterlagen wird es somit möglich, Standardarbeits- und -montagepläne für ähnliche Bauteile und Baugruppen zu entwickeln.

Ein früher Schwerpunkt lag auf der Gruppentechnologie zur Entwicklung von Systemen, die das Auffindung von bereits erstellten Arbeitsplänen für ähnliche Teile ermöglichen, um sie in einem nächsten Schritt spezifisch anzupassen (VDI-EKV 1992). Diese Systeme haben zu einer erheblichen Reduzierung der Routenarbeit in der Arbeitsplanerstellung für die konventionelle Fertigung beigetragen (DEUSE 1998). Ende der siebziger Jahre wurden erste generative Arbeitsplanungssysteme entwickelt, mit denen sich Arbeitspläne automatisch auf der Basis von Werkstückbeschreibungen generieren lassen. Zur Abbildung des Planungswissens werden Entscheidungstabellen genutzt, die zwar zu einer Trennung des fertigungstechnischen Wissens vom Programmablauf, aber auch zu einer mangelnden Transparenz bei einer wachsenden Anzahl an Regeln führen. Frühe Prototypen zeigten schon bald, dass rein regelbasierte Systeme ineffizient arbeiten und folglich keine Möglichkeit bieten, komplexes Beziehungswissen abzubilden. Isolierte Programmierparadigmen, wie z.B. bei reinen regelbasierten Systemen ohne Unterstützung objektorientierter Methoden, sind nicht mächtig genug, um

komplexe Wissensstrukturen wiederzugeben. Im Gegensatz hierzu nutzen hybride Systeme eine Verflechtung verschiedener Wissensdarstellungsformen und Schlussfolgerungsmethoden und nähern sich damit einer natürlichen Wissensrepräsentation an. Neuere Entwicklungen in diesem Forschungsbereich, wie beispielsweise Objektorientierung und Begriffshierarchien mit regelbasierten Ansätzen, belegen, dass anfängliche Umsetzungsprobleme wissensbasierter Systeme in der Arbeitsplanung behoben werden können (HAMELMANN 1995, ZAHN 1999). Dies wird auch durch den Erfolg kommerzieller Systeme verdeutlicht, die auch das von VAN HOUTEN (1991) und GÜNTER & KÜHN (1999) beschriebene Problem der mangelhaften Wartbarkeit der Wissensbasis, z.B. durch eine strukturierte Zuordnung von Regeln zu Wissensobjekten, lösen (PART (VAN HOUTEN 1991), XPLAN (ALTING et al. 1988), AVOPLAN (HAMELMANN 1995), ENGINE-OBJECT (EVERSHEIM et al. 2002), ET-EPOS (GÜNTER et al. 1999) und camos.CAPP (NEUDORFER 2005, WAGNER 2006a)).

3.3 Die Digitale Fabrik in der Montageplanung

3.3.1 Allgemeines

Die Integration von Produkt- und Prozessdaten in der Montageplanung wird sowohl von Seiten der wissenschaftlichen Forschung als auch von kommerziellen Softwareanbietern intensiv untersucht (BLEY & BOSSMANN 2005). Dabei beeinflussen sich wissenschaftliche Forschung und softwaretechnische Umsetzung stark. Es lassen sich diesbezüglich drei Phasen unterscheiden: In der ersten Phase stand die Entwicklung methodischer Grundlagen für eine integrierte Montageplanung im Vordergrund, die in ersten universitären Prototypen gemündet sind. In der zweiten Phase wurde insbesondere die Umsetzung bei verschiedenen Anwendern aus dem Automobilbau untersucht. Parallel dazu wurden die kommerziellen Werkzeuge eM-Planner[®] und DELMIA Process Engineer[®] entwickelt, die heute noch eine dominante Stellung auf dem Markt der Systeme zur Umsetzung der Digitalen Fabrik einnehmen. In der dritten, noch heute andauernden Phase beschäftigt sich die universitäre Forschung stark mit der methodischen Erweiterung der in der zweiten Phase etablierten, kommerziellen Systeme. Hierbei werden verschiedene Ansätze verfolgt, die von der Integration der Produktentwicklung durch die Featuretechnologie über die Anbindung von Ablaufsimulationen an Prozessplanungswerkzeuge bis hin zu einer stärkeren Unterstützung für eine variantenreiche Planung reichen.

Die Darstellung des Standes der Technik der Digitalen Fabrik folgt der chronologischen Entwicklung in der Forschung. Zunächst wird in Abschnitt 3.3.2 die grundlegende Methode der Montageplanung und deren Umsetzung in verschiedenen universitären Prototypen vorgestellt. Darauf aufbauend wird in Abschnitt 3.3.3 die Umsetzung dieser ersten Ansätze in kommerzielle Planungswerkzeuge bei zwei unterschiedlichen Automobilherstellern erläutert. Der Abschnitt 3.3.4 stellt die Erweiterung dieser kommerziellen Systeme in der universitären Forschung vor. In Verbindung mit dem bereits beschriebenen Stand der wissenschaftlichen Systeme wird hieraus in Abschnitt 3.4 der Handlungsbedarf für die vorliegende Arbeit abgeleitet.

3.3.2 Grundlegende Methode und universitäre Prototypen

Seit Ende der siebziger Jahre wurde eine Vielzahl von Ansätzen zur rechnergestützten Montageplanung entwickelt (z.B. RICHTER et al. 1974, HIRSCHBACH 1978, ESCH 1985, KÖHLER 1989, THALER 1993). Ein Großteil dieser Arbeiten legt allerdings seinen Schwerpunkt auf die Einzel- und Kleinserienmontage, bei der primär der Montageablauf und weniger die Systemplanung im Vordergrund steht.

Speziell mit der Thematik der Montageablaufplanung bei Serienfertigern setzt sich THALER (1993) auseinander. Er entwickelt ein Verfahren zur Regelinduktion, um auf der Basis einer Vielzahl von Vorrangtabellen für unterschiedliche Produkte eine Regelbasis zu generieren. Diese wendet er auf einen neutralen Ablaufplan an und erhält somit einen teilspezifischen Vorranggraphen. THALER (1993) beschäftigt sich nicht detailliert mit der Integration von Produktentwicklung und Montageplanung, erwähnt sie allerdings in seinem Ausblick, in dem er große Synergieeffekte in der Verknüpfung von regelbasierten Ansätzen von Mehrprodukt-/Variantenstücklisten und Mehrproduktvorranggraphen vermutet.

Die von THALER (1993) geforderte Integration von Produktentwicklung und Montageplanung wurde im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 336 am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften an der Technischen Universität München untersucht (SFB336 1997), allerdings ohne die Variantenplanung im Detail zu adressieren. In diesem Sonderforschungsbereich entwickelte FELDMANN (1997) eine Montageplanungsmethode, die sich in fünf Schichten gliedert und auf den Konstruktionsergebnissen sowie den darüber liegenden Schichten bereits erzeugter Daten der Montageplanung aufbaut (Abbildung 29).

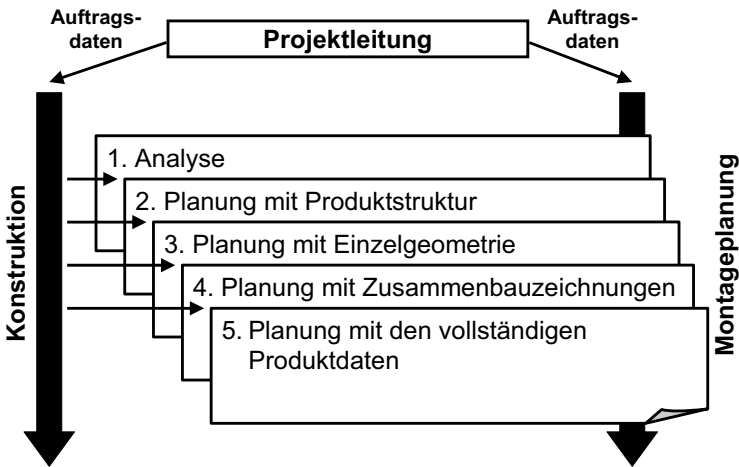


Abbildung 29: Die Fünf-Schichten-Methode der Montageplanung (nach FELDMANN 1997)

Auf dieser Methode basiert das objektorientierte System CosMonAut (Computersystem zur Montage-Automatisierung). Ähnlich wie moderne, kommerzielle Ansätze ist auch dieses System als Integrationskern mit einem CAD-, einem 3D-Simulationssystem und einem Betriebsmittelkonfigurationssystem für ein Rechnerverbundsystem konzipiert (FELDMANN 1997). CUIPER (2000) erweitert diesen Ansatz dahingehend, dass alle Aktivitäten der Montageplanung, von der Ableitung des Montagevorranggrafen bis zur Inbetriebnahme des Montagesystems, integriert sind. Mit Hilfe einer grafischen Benutzeroberfläche ist es in CosMonAut möglich, Montagevorgänge anzuordnen und zu hierarchisieren. Der Montageablauf bildet hierbei die Basis für die spätere Offline-Programmierung einer robotergestützten Montageanlage. Das System hat sich bei der Planung automatisierter Montageanlagen mit einer begrenzten Anzahl an Planungsvarianten als sinnvoll erwiesen (FRANKE 2003). Es ist allerdings auf die automatisierte Montage beschränkt und unterstützt nicht explizit die Variantenplanung.

Auch im Rahmen des Leitprojektes iViP (Integrierte Virtuelle Produktentstehung) (KRAUSE et al. 2002), das die Entwicklung neuartiger Produkte in der frühen Phase im Blickpunkt hatte, wurde in Randbereichen die Montageplanung mit einbezogen. Der Schwerpunkt bei der Montageplanung lag auf der Simulation komplexer Bewegungen und der Integration von Force-Feedback-Applikationen in die Erstellung von Planungsszenarien (MÜHL 2002). Ein wichtiger Aspekt des

Projektes iViP ist die Verwendung von XML anstatt des zunächst bevorzugten EXPRESS-Standards (BLENCKE et al. 2002). Dies ist in der Verwendung von XML als Standard in vielen PLM-Systemen sowie der Verfügbarkeit mächtiger Konvertierungswerkzeuge auf der Basis der Extensible Style Language Transformation (XSLT) begründet. Die beiden Begriffe XML und XSLT werden in Abschnitt 6.3.2 noch detaillierter aufgegriffen. Das iViP-Verbundprojekt ist insofern typisch für die universitäre Forschung, als es im Gegensatz zu den später entwickelten kommerziellen Systemen stark auf der Verwendung von offenen Standards beruht. So finden bei der Konzipierung durchgängiger Informationsmodelle vor allem STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) und CORBA (Common Object Request Broker Architecture) Anwendung. Einige Ansätze verwenden das Application Protocol AP 214 oder ISO 10303 (STEP), um Produktdaten und damit verknüpfte Prozessdaten an einen Prozessmodellierer oder direkt an ein Simulationswerkzeug zu übergeben (NIELSEN et al. 2000). Das iViP-Projekt beschäftigte sich schwerpunktmäßig mit der Produktplanung. Eine Montageplanung wurde nur im Hinblick auf die Validierung und Absicherung von virtuellen Produkten, insbesondere bezüglich ihrer Geometrie, betrachtet (KRAUSE et al. 2002). Damit lag der Hauptfokus auf der verteilten Entwicklung von Produkten und nicht auf einer integrierten Montageplanung. Dies spiegelt sich auch in der Einbindung von PLM-Anbietern wie Eigner & Partner (heute Agile Software GmbH) sowie SAP in das Projektkonsortium und dem Fehlen von Anbietern der Digitalen Fabrik wie DELMIA oder Tecnomatix/UGS wider.

3.3.3 Umsetzung in kommerziellen Systemen

3.3.3.1 Allgemeines

Die zweite Phase der Entwicklung der Digitalen Fabrik ist geprägt von der Einführung und Weiterentwicklung kommerzieller Montageplanungswerkzeuge. Zu den zentralen Veröffentlichungen in diesem Forschungsbereich gehören die Arbeiten von JONAS (2000) und KLAUKE (2002), die zur Konzeption und jeweiligen Umsetzung der beiden kommerziellen Lösungen eM-Planner[®] und DELMIA Process Engineer[®] bei zwei großen Automobilherstellern beigetragen haben. In diesem Abschnitt wird anhand dieser wissenschaftlichen Arbeiten und weiteren ausgewählten Quellen ein Überblick über die eingesetzten Methoden und die Funktionalität der Systeme gegeben.

Im Rahmen der Digitalen Fabrik wird, wie bereits in Abschnitt 2.5.3 dargestellt, eine Vielzahl von Simulationstechnologien auf den unterschiedlichen Unternehmensebenen miteinander verknüpft, um durch die gemeinsame Datenhaltung Synergieeffekte nutzen zu können (BLEY & BOSSMANN 2005). Die praktische Umsetzung steht hierbei noch am Anfang, was sich auf zwei Problemfelder zurückführen lässt. Zum einen ist der Modellierungs- und Berechnungsaufwand für umfassende und detaillierte Modelle noch sehr hoch und daher kostenintensiv, was den Einsatz einzelner Simulationswerkzeuge behindert. Zum anderen besteht ein Hemmnis in Bezug auf die Integration der Simulationstools sowohl untereinander als auch mit dem Produktdatenmanagement. Aus Sicht von BLEY & BOSSMANN (2005) muss es das Hauptziel sein, auch in heterogenen Systemwelten Daten, Produktstrukturen und Modellinformationen austauschen zu können. Um die Austauschbarkeit der Daten zu erreichen, wird von vielen Autoren die Notwendigkeit einer zentralen Datenbank zur Verwaltung und Strukturierung der Daten angeführt, wie sie bereits im vorherigen Abschnitt dargestellt und von FELDMANN (1997) und CUIPER (2000) in einem universitären Prototypen umgesetzt wurde. Hersteller von Simulationssoftware haben diese Notwendigkeit ebenfalls erkannt und versuchen deshalb, vielfältige Werkzeugen anzubieten, die sie innerhalb ihrer eigenen Produktpalette miteinander vernetzen. Hierdurch sollen homogene, in sich geschlossene und stabile Systemwelten geschaffen werden. Als Beispiele hierfür sind die Unternehmen DELMIA und UGS zu nennen, die ein ähnliches Grundkonzept verfolgen. Beide verwenden eine Datenbank, an die Werkzeuge zur Prozessplanung sowie zur Roboter- und Ergonomiesimulation angebunden werden. Der Vorteil der Ansätze besteht darin, dass die durchgängige Datennutzung gewährleistet ist und somit im unternehmensinternen Netzwerk ein verteiltes Arbeiten mit stets aktuellen Daten möglich ist (FLEISCHER et al. 2004). Ein wesentlicher Nachteil ist dagegen, dass der Anwender dadurch in der Regel auf die Palette des jeweiligen Softwarehauses beschränkt ist (BURR et al. 2003).

Allgemeines Ziel der integrierten Montageplanung, wie sie im Sinne des Simultaneous Engineering von JONAS (2000) und KLAUKE (2002) verfolgt wird, ist die parallele Planung von Produkt und Produktionsprozess. Hierzu ist es notwendig, dass bereits vor Abschluss der Konstruktion erste Ergebnisse mit Angaben, in welchen Bereichen noch Veränderungen möglich sind, an die Montageplanung übermittelt werden (siehe Abbildung 30). Im Speziellen verfolgt JONAS (2000) das Ziel, eine Methode für die Planung von Montageanlagen zu erarbeiten, die einen verkürzten Produktentstehungsprozess ermöglicht.

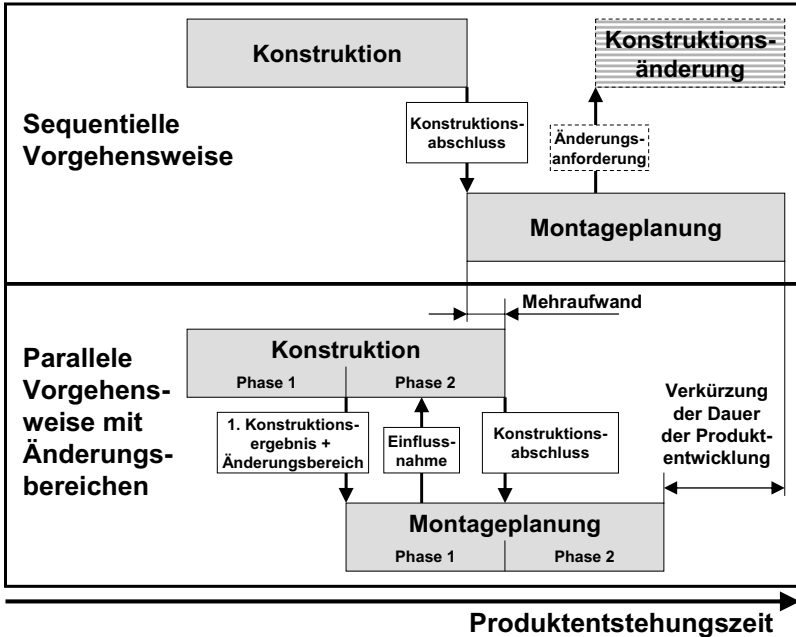


Abbildung 30: Gegenüberstellung sequentieller und paralleler Vorgehensweisen bei Konstruktion und Montageplanung (nach JONAS 2000)

Die Planungsmethode soll im Hinblick auf eine zukünftige Digitale Fabrik, d.h. auf einen vollständig und durchgängig rechnergestützten Produktentstehungsprozess, gestaltet werden. Hierzu entwickelt er sowohl ein Datenmodell zur Beschreibung der notwendigen Elemente und ihrer Beziehungen als auch Funktionen zur Entlastung des Planers. Den Einsatz wissensbasierter Systeme zur Unterstützung des Planers hält JONAS (2000) zwar für denkbar, verfolgt ihn allerdings nicht weiter, da er die Auffassung vertritt, dass diese Systeme lediglich Teilfunktionen abdecken können und somit nur in Spezialfällen einsetzbar sind. Auf welche Teilfunktionen und Spezialfälle sich der Einsatz wissensbasierter Systeme beschränkt, wird jedoch nicht explizit erwähnt.

KLAUKE (2002) definiert ihre Zielsetzung als die effiziente Unterstützung von parallelen und verteilten Prozessplanungsprozessen, die sowohl Einsparungen in Form von Zeit und Kosten im Bereich der taktischen Prozessplanung erzielen als auch die Planungsqualität erhöhen sollen. Auf diese Weise sollen die Arbeitsbedingungen der Menschen in der Prozessplanung durch entsprechende Planungs-

hilfsmittel verbessert werden. Ähnlich wie JONAS (2000) entwickelt sie hierfür ein Datenmodell und eine methodische Unterstützung. Als Erweiterung zu der Arbeit von JONAS (2000) beschränkt sie sich allerdings nicht nur auf die Montage, sondern bezieht auch die Bereiche Karosseriebau und Komponentenfertigung mit ihren jeweils spezifischen Anforderungen ein. Den möglichen Einsatz wissenschaftlicher Methoden sieht sie im Bereich der Komponentenfertigung für die Technologieauswahl. Die weitere Ausführung dieses Aspekts liegt allerdings nicht im Fokus ihrer Arbeit.

Die Datenmodelle von JONAS (2000) und KLAUKE (2002), die in die kommerziellen Systemen eM-Planner[®] bzw. DELMIA Process Engineer[®] eingeflossen sind, basieren, wie schon die Modelle von FELDMANN (1997) und STEINWASSER (1997), auf einer Einteilung in die drei Hauptklassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE. Entsprechend der Konvention von STEINWASSER (1997) werden im weiteren Verlauf der Arbeit Objekte, die Klassen bezeichnen, wie z.B. PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE, in Großbuchstaben geschrieben. In den nächsten Abschnitten wird vorwiegend auf die Datenstruktur nach JONAS (2000) Bezug genommen. Diese ist in weiten Bereichen identisch mit den Beschreibungen von KLAUKE (2002), allerdings in ihren Ausführungen im Bereich der Datenmodellierung detaillierter. Die Datenstruktur wird mit Hilfe der Unified Modeling Language (UML) dargestellt, deren Notation im Anhang dieser Arbeit (siehe Abschnitt 9.2) erläutert ist. Die Einteilung in die Klassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE wird im Folgenden genutzt, um das Datenmodell nach JONAS (2000) zu erläutern.

3.3.3.2 Datenmodell der Basisklassen

Das Datenmodell für die Basisklassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE ist eine wichtige Voraussetzung für das weitere Verständnis der vorliegenden Arbeit. Abbildung 31 veranschaulicht die verknüpften Informationen dieser Basisklassen, aus denen sich die Anforderungen an das Datenmodell ableiten lassen.

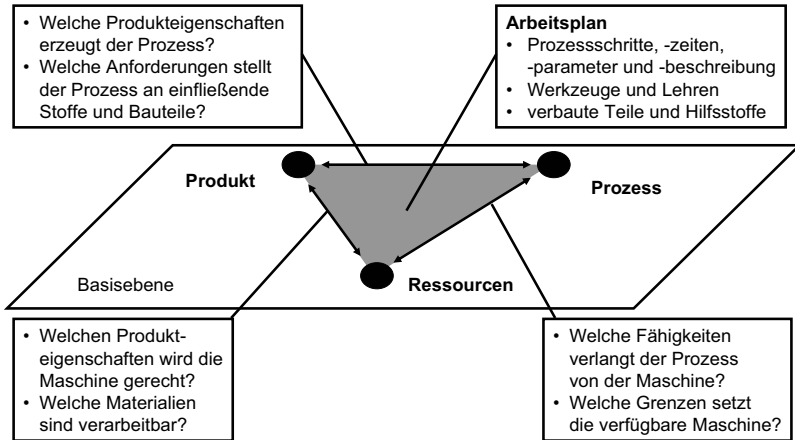


Abbildung 31: Die verknüpfte Information der Basisklassen als Bezugsstruktur zur Abbildung des Datenmodells (nach KLAUKE 2002)

Produkt

Im Automobilbereich lässt sich die Struktur eines Fahrzeuges beispielsweise nach Modulen abbilden. Dies wird in der Klasse PRODUKT mit einer *TEIL-GANZE*-Beziehung umgesetzt. Darüber hinaus werden die Eigenschaften, die Kosten oder die Masse aller Bauteile und bauteilübergreifende Informationen, wie Verbindungselemente oder Toleranzen, als Merkmale abgebildet. Die Montageplanung muss oftmals Informationen aus unterschiedlichen Bereichen, überwiegend aus der Konstruktion aber auch aus dem Einkauf, der z.B. Farbkombinationen festlegt, oder von externen Zulieferern in teilweise nicht kompatiblen Formaten verarbeiten. Daher werden bei den Ansätzen von JONAS (2000) und KLAUKE (2002) die Produktinformationen redundant bei der Konstruktion und der Montageplanung verwaltet. Hierbei wird die Produktstruktur aus konstruktiver Sicht mit den jeweiligen Informationen zu den Einzelteilen in das Datenmodell der Montageplanung übertragen. Dies ist in Abbildung 32 in der UML-Notation skizziert, die im Anhang dieser Arbeit (siehe Abschnitt 9.2) erläutert ist.

Da die Produktstruktur in der Montagereihenfolge nicht notwendigerweise derjenigen Reihenfolge der Konstruktion entsprechen muss, wird neben dem Modell des *Konstruktionsproduktes* das Modell des *Planungsproduktes* aufgebaut. Es handelt sich hierbei um unterschiedliche Strukturen, die verschiedene Sichten auf das Produkt wiedergeben und mit einer Konstruktions- bzw. Fertigungsstückliste vergleichbar sind.

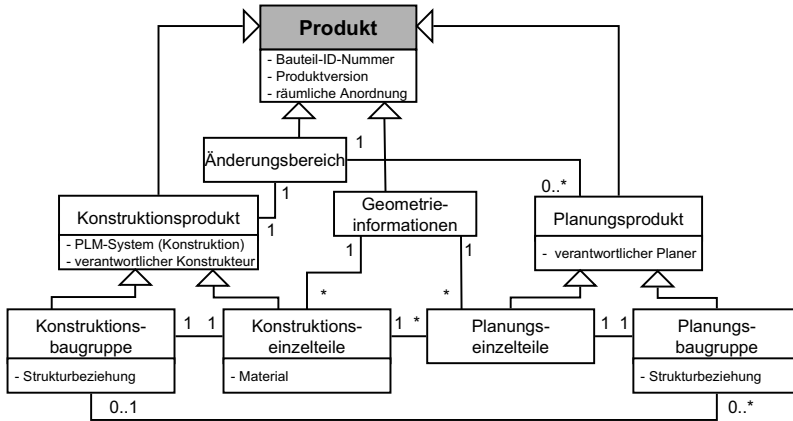


Abbildung 32: Klasse *PRODUKT* mit zugeordnetem Konstruktions- und Planungsprodukt (nach JONAS 2000)

So bestehen das Konstruktionsprodukt wie auch das Planungsprodukt aus Baugruppen und Einzelteilen. Die Beziehung zwischen Einzelteilen des Konstruktionsproduktes zu denen des Planungsprodukts ist eine 1:n-Multiplizität, da eine Vielzahl von möglichen Planungsproduktalternativen oder -varianten ein einzelnes Planungsbauteil beinhalten, das jeweils auf ein konkretes Konstruktionseinzelteil referenziert. Aus diesem Grund werden Konstruktionseinzelteile meist als Bibliothekselemente verwaltet, auf welche die verschiedenen Planungseinzelteile, die in unterschiedlichen Varianten oder Alternativen vorliegen können, jeweils verweisen.

Eine Assoziation auf Baugruppenebene ist nur gegeben, wenn die Planungs- und Konstruktionssicht die gleiche Struktur aufweisen. JONAS (2000) führt an, dass die Produktalternativen und -varianten hohe Anforderungen an die Montageplanung stellen. Aus diesem Grund ist in der Montageproduktstruktur die Möglichkeit vorgesehen, innerhalb der Identifikationsnummer der Objekte sowohl die Bauteilnummer als auch eine Angabe zu Variante und Alternative abzulegen. Der strukturelle Aufbau der Produktvarianten bzw. der -alternativen wird über eine Assoziation zwischen Einzelteilen und Baugruppen realisiert. Hierdurch wird die Beziehung von Baugruppen zu Produktvarianten dokumentiert. Innerhalb der Produktstruktur können mehrere Varianten aktiviert werden, um so den gemeinsamen Bezug zu Montagevorgängen leichter herstellen zu können.

Prozess

Die Klasse PROZESS, bei JONAS (2000) auch als Vorgang bezeichnet, verwaltet alle Montagevorgänge, die direkt oder indirekt zum Montagefortschritt beitragen. Ebenso wie das Produkt werden Montagevorgänge hierarchisch auf verschiedenen Detaillierungsebenen abgebildet (siehe Abbildung 33). Dies wird über das Attribut *Strukturbeziehung*, das die *Vater-Sohn-Beziehungen* der Montagevorgänge zum Ausdruck bringt, realisiert.

Die Struktur der Montagevorgänge wird analog zur Produktstruktur darstellt. Hierdurch kann auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen geplant werden. Diese Entsprechung geht bis zur Einzelteilebene. Für eine exakte Planung der Montagevorgänge ist allerdings noch eine weitere Detaillierungsstufe notwendig. Diese beinhaltet Elemente, wie z.B. Einzelteile positionieren, verschrauben oder kontrollieren (siehe Abbildung 33).

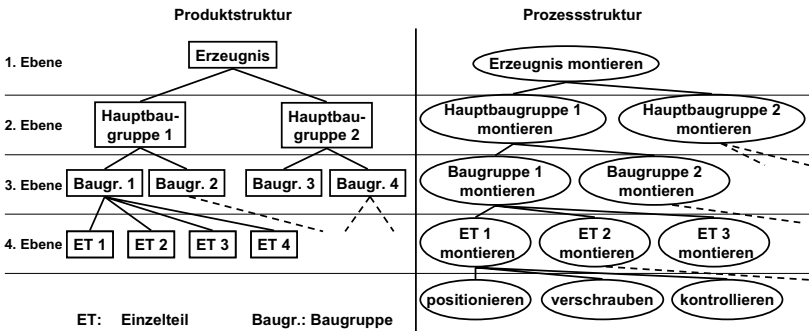


Abbildung 33: Gegenüberstellung der hierarchischen Produkt- und Prozessstruktur nach Gliederungsebenen (nach JONAS 2000)

Im Datenmodell wird die Verknüpfung zwischen der Klasse PROZESS und der Klasse PLANUNGSPRODUKT über die Klasse MONTAGEPOSITION erstellt (siehe Abbildung 34). Dies ermöglicht eine individuelle Zuordnung des verknüpften Produktelementes zum Montagevorgang. Neben der hierarchischen Gliederung auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen ist zusätzlich die Angabe der zeitlichen Beziehung (sequentiell, parallel, alternativ) zwischen Vorgängern erforderlich, um eine durchgängige Planung zu ermöglichen.

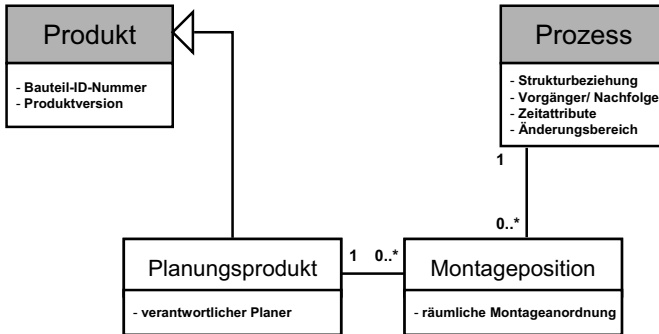


Abbildung 34: Klasse PROZESS mit der Zuordnung zur Klasse PLANUNGS-PRODUKT über die Klasse MONTAGEPOSITION (nach JONAS 2000)

Der Montageablauf wird hierbei über die Merkmale *Vorgänger* und *Nachfolger* in der Klasse PROZESS dokumentiert. Zur Darstellung der Abläufe wird in den meisten Fällen auf die Netzplantechnik zurückgegriffen. Ergänzend hierzu kann eine Ansicht mit Balkendiagrammen gewählt werden, um insbesondere die Vorgangsdauern zu visualisieren.

Ressource

In der Klasse RESSOURCE werden die Montageanlagen und deren Komponenten verwaltet. Hierunter ist beispielsweise die Beschreibung einer Montagelinie über Bandabschnitte sowie Montage- und Bereitstellakte zu verstehen, in der Struktureinheiten (z.B. Halle), organisatorische Einheiten (z.B. Meisterbereiche), Fertigungsmittel (z.B. Roboter) oder auch Personal enthalten sein können. Der Aufbau der Klasse ist mit derjenigen von Produkten vergleichbar. Es existiert eine hierarchische Struktur, in der Fertigungsmittel bzw. organisatorische Einheiten durch eine Identifikationsnummer und eine entsprechende Angabe zu Variante und Alternative dargestellt werden (siehe Abbildung 35).

Analog zur Klasse PRODUKT wird die *Vater-Sohn*-Beziehung über das Attribut *Strukturbeziehung* realisiert. Hierarchieebenen lassen sich beliebig verfeinern, so dass Fertigungsmittel bis auf Komponentenebene zergliedert werden können. JONAS (2000) stellt in detaillierter Art und Weise ein Vorgehensmodell zur Abbildung von Planungsalternativen vor, die meist aus Veränderungen an den Montageanlagen oder den Layoutanordnungen hervorgehen. Oftmals sind hiervon nur Teilbereiche der Gesamtplanung betroffen.

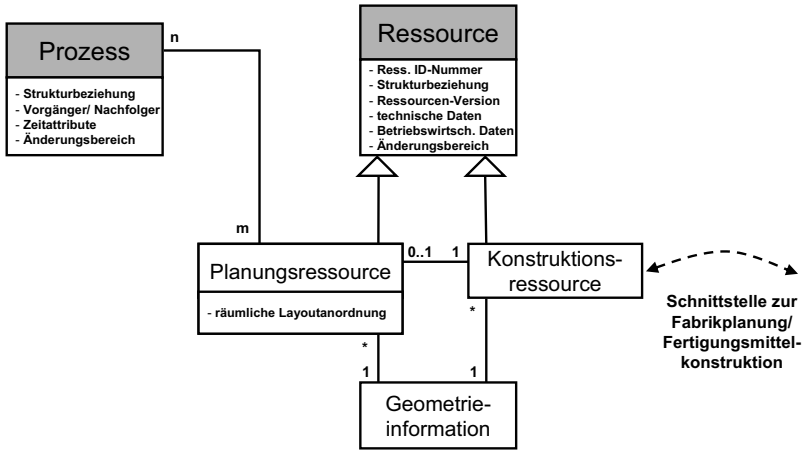


Abbildung 35: Klasse RESSOURCE in Assoziation mit der Klasse PROZESS mit Anbindung an Fabrikplanung bzw. Fertigungsmittelkonstruktion (nach JONAS 2000)

Bei der Erstellung einer Planungsalternative ist es notwendig, dass die Schnittstellen zu anderen Bereichen, wie zum Beispiel dem Eingang oder Ausgang der Station, für alle Alternativen exakt übereinstimmen. Falls sich die Baugruppenstruktur des Produktes für unterschiedliche Alternativen verändert, sollte die Planungsalternative auf der nächst höheren Hierarchieebene angelegt werden. Bei der Erstellung einer Lösungsalternative für ein Objekt der Ressourcenstruktur sind alle Kindelemente dieses Objektes ebenfalls betroffen. Hierdurch besitzt jede Planungsalternative, ausgehend von dem Objekt, für das sie erstellt wird, eigenständige Objekte der darunter liegenden Detaillierungsebenen. Die Kombination verschiedener Ressourcenalternativen erfolgt durch deren manuelle Aktivierung. Hierbei kann immer nur genau eine Alternative aktiv sein. Dies bedeutet, dass eine Alternative auf einer oberen Ebene jeweils aus den aktiven Unteralternativen besteht.

3.3.3.3 Überblick über das gesamte Klassenkonzept

Neben den beschriebenen drei Basisklassen existiert bei den Ansätzen von JONAS (2000) und KLAUKE (2002) noch eine Vielzahl weiterer Klassen, die den Planungsprozess umfassend unterstützen. Ein Überblick über die wichtigen Klassen des Datenmodells von KLAUKE (2002) wird in Abbildung 36 gegeben.

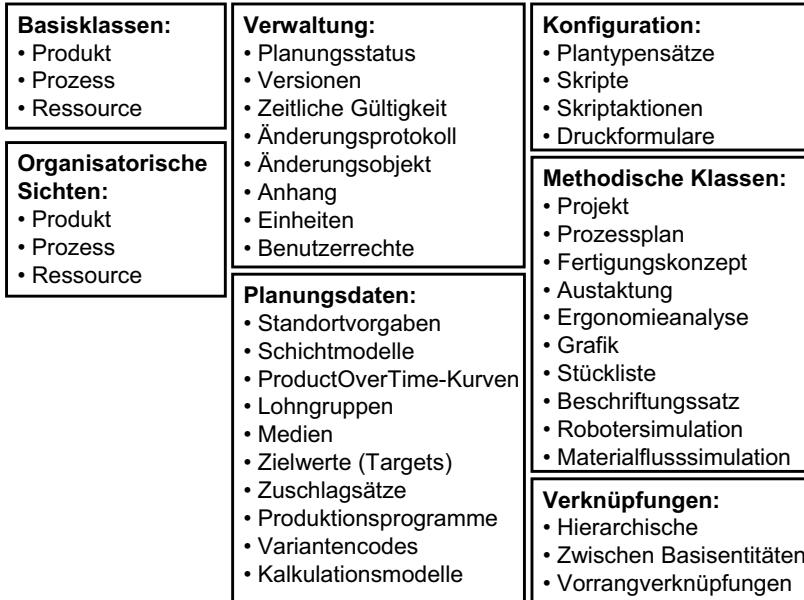


Abbildung 36: Grobstruktur der Klassen des Referenzmodells der „Offenen Virtuellen Fabrik“ als Grundlage des kommerziellen Systems DELMIA Process Engineer® (nach KLAUKE 2002)

Sie veranschaulicht die bereits detailliert vorgestellten Basisklassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE, die sich in Abhängigkeit von den jeweiligen Anforderungen in verschiedenen organisatorischen Sichten zusammenfassen und darstellen lassen. Dies wird in Abbildung 36 durch die Basisklassen und organisatorischen Klassen verdeutlicht.

Zusätzlich sind verschiedene Arten von Verknüpfungen Teil des Datenmodells. Unterschiedliche Detaillierungsebenen lassen sich in einer hierarchischen Struktur darstellen. Des Weiteren sind Verknüpfungen zwischen Basisentitäten notwendig, um den Zusammenhang zwischen Produkten, möglichen Montageprozessen und geeigneten Ressourcen abzubilden. Vorrangverknüpfungen dienen hierbei hauptsächlich den zeitlichen Anordnungen von Prozessklassen. Für die Verwaltung der Daten werden die Klassen PLANUNGSTATUS, VERSIONEN, ZEITLICHE GÜLTIGKEIT, ÄNDERUNGSPROTOKOLL und ÄNDERUNGSOBJEKT genutzt. Jedem Planungsobjekt der Klassen PRODUKT, PROZESS oder RESSOURCE kann ein bestimmter Variantencode zugeordnet werden, der

durch die Angabe der Ausstattungsmerkmale in Form Boolescher Verknüpfungslogik beschrieben wird. Projektdaten können durch den Einsatz von Filtern für eine spezifische Variante oder für die Gesamtheit aller Varianten angezeigt werden. Für eine detaillierte Beschreibung der Klassen mit ihren Subklassen, Attributen und Methoden verweist KLAUKE (2002) auf den Anhang ihrer Arbeit, ohne diese dort detailliert zu beschreiben. Sie erläutert, dass es sich bei dem vorgestellten Datenmodell um eine Grundstruktur handelt, die projektspezifisch zu konfigurieren ist.

Hierfür stehen unter anderem die folgenden Hilfsmittel zur Verfügung:

- Konfigurationswerkzeuge
- Plantypensätze
- Skripte

Über das Konfigurationswerkzeug werden die im Referenzmodell festgelegten Klassen mit ihren konkreten Attributen definiert. Aus den Basisklassen, die als Typen bezeichnet werden, können bei Bedarf Subklassen abgeleitet werden, die spezifisch modifiziert werden können. Diese Plantypensätze ermöglichen die Anpassung der grundlegenden Struktur an unterschiedliche Anforderungen der Prozessplanung in verschiedenen Bereichen, wie z.B. Karosseriebau oder Endmontage. Für diese Anwendungsfälle müssen spezifische Basisklassen und deren organisatorische Sichten bestimmt werden, wobei die Möglichkeit besteht, im Plantypensatz die Hierarchieebenen von Klassen und ihren Objekten festzulegen.

Skripte werden verwendet, um bestimmte Funktionen zu automatisieren. Als Beispiel hierfür kann die Erstellung von Auswertungen auf der Basis von Planungsdaten angeführt werden. Auf diese Weise können vordefinierte Attribute gesammelt und die Auswertung sowie gezielte automatische Bearbeitung, wie z.B. die Berechnung mit Zuschlagsfaktoren, durchgeführt werden. Die Ausführung von Skripten kann auf unterschiedliche Weise aufgerufen werden. Sie können sowohl manuell gestartet als auch an die Ausführung bestimmter Aktionen des Anwenders gebunden werden. Die Erstellung von Skripten ist mit Standardsprachen wie Visual Basic Script oder Java Script möglich. Ihre Ausführung eröffnet breite Möglichkeiten der Anwendungen und dient dazu, den Workflow und die Funktionen des Planungssystems individuell anzupassen.

3.3.3.4 Automatisierung der Planung

Die von JONAS (2000) und KLAUKE (2002) vorgestellten Datenmodelle bilden die Basis für eine umfassende Rechnerunterstützung. Die Abbildung der Planungsinhalte im Modell ist jedoch aufgrund der vielfältigen Klassen und Verknüpfungen sehr zeitaufwendig. Aus diesem Grund sind Funktionen notwendig, welche die Anwenderfreundlichkeit unterstützen und auf diese Weise den Planer beim Aufbau einer neuen Planungsmodellstruktur entlasten sollen. Dies sind im Einzelnen:

- Automatismen für die Erstellung und Überprüfung der Planungsdaten
- die Übernahme bestehender Planungsinhalte in neue Planungsprojekte
- die grafischen Oberflächen zur einfachen Systembedienung
- die Integration beziehungsweise die Anbindung eigenständiger Systeme, wie z.B. zur Simulation, sowie Funktionen zur Dokumentation

Eine annähernd automatische Durchführung der Planung hält JONAS (2000) auch durch den Einsatz von wissensbasierten Systemen für realisierbar. Da sich diese seiner Ansicht nach nur für spezielle Anwendungsfälle eignen und aufgrund vieler abstrakter Planungselemente, wie z.B. Optimierungsregeln und -vorschriften, nur von geübten Anwendern beherrscht werden können, werden sie von ihm nicht weiter verfolgt. KLAUKE (2002) verweist mit einer umfassenden Vorstellung von Skripten nur auf prozedurale Formen der Wissensrepräsentation. JONAS (2000) und KLAUKE (2002) sehen somit für den groben Aufbau einer Grundstruktur eines neuen Planungsprojektes nur eine rudimentäre Unterstützung vor, nach der für jede Baugruppe automatisch ein Vorgang und eine Ressource mit den jeweiligen Verknüpfungen angelegt werden. Auf einer detaillierten Ebene nutzt JONAS (2000) drei zentrale Funktionen:

- Einzelteile einer Baugruppe müssen zur Station transportiert werden.
- Zwischen den Stationen muss ein Transport der Baugruppen erfolgen.
- Die Verbindungsinformationen zwischen den einzelnen Teilen einer Baugruppe müssen in der Station bearbeitet werden.

Weiterhin schlägt er eine Überprüfung der Planungsinhalte auf Konsistenz vor. Hierdurch sollen Fehler im Planungsinhalt bei einer manuellen Erstellung oder Nachbearbeitung ausgeschlossen werden. Ein Beispiel hierfür ist die Überprüfung der Verknüpfungslogik, nach der ein Bauteil nicht mit Vorgängen oder Ressourcen einer nicht vorgesehenen Hierarchiestufe in Beziehung gesetzt wer-

den darf. Diese Verknüpfung wird vom Anwender manuell gestartet und bietet daher die Möglichkeit, über ein prozedurales Skript eine Überprüfung durchführen zu lassen.

Für die Übernahme bestehender Planungsinhalte stellt JONAS (2000) das Kopieren und Einfügen einzelner Objekte oder kompletter Strukturen vor. Hierzu werden Bibliotheken verwendet, die Standardelemente oder Beispiele für die Planung zur Verfügung stellen. Grundsätzlich können alle Klassen des Datenmodells auch Elemente einer Bibliothek sein. Die Bibliotheksobjekte sind normale Objekte der jeweiligen Klasse mit dem einzigen Unterschied, dass in ihrer Strukturbeziehung das Vaterobjekt BIBLIOTHEK hinterlegt ist. Diese Elemente können durch einfaches Kopieren und Einfügen in die projektspezifische Struktur der Planung dort direkt verwendet werden. Da Produktinformationen aus der Konstruktion übernommen werden, ist für diese keine Bauteilebibliothek vorgesehen. Die Anwendung eines Bibliothekskonzeptes beschränkt sich daher auf die Prozess- und Ressourcenelemente. Das kopierte Objekt erhält hierbei automatisch die speziellen Attributwerte des Bibliothekstyps. Weiterhin ist es auch möglich, mehrere einzelne Objekte zu Gruppen zusammenzufassen. So kann beispielsweise eine komplette Montagestation mit allen Einzelobjekten in einer Bibliothek gespeichert werden. Auf diese Weise können sehr schnell umfangreiche Planungsinhalte erstellt werden. Ein weiterer Vorteil besteht in einer möglichen Standardisierung mit Hilfe von Bibliotheken, in denen Objekte zentral für die Planung vorgegeben werden können. Da alle Planer auf die gleichen Bibliotheken zugreifen, werden die hinterlegten Bibliotheksobjekte automatisch zu Planungsstandards (MACKE 2006). Hiermit wird durch rückfließende Erfahrungen eine kontinuierliche Verbesserung der Datenqualität der Modellelemente über mehrere Planungsprojekte hinweg erreicht (siehe Abbildung 37).

Als weitere Möglichkeit zur Beschleunigung des Aufbaus der Strukturbäume können Inhalte aus vorangegangenen Planungsprojekten direkt in neue übernommen werden. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die betreffenden Planungsinhalte in der erforderlichen Struktur des Datenmodells abgebildet wurden. Derartige Daten stammen üblicherweise aus Projekten von Vorgängerprodukten. Im Unterschied zu Bibliotheken werden hierbei zusätzlich zu den Objekten auch deren Verknüpfungen übernommen.

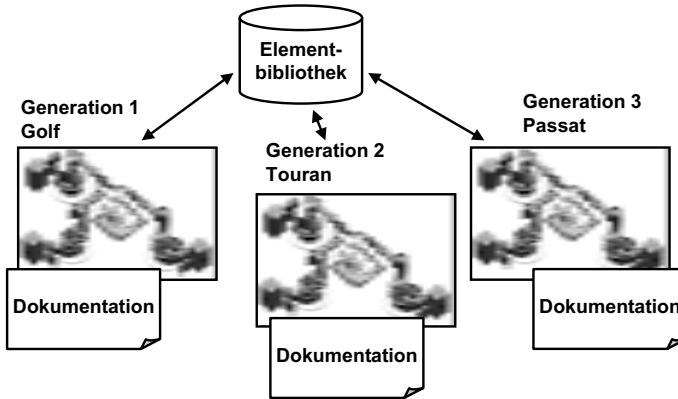


Abbildung 37: Stammmodell mit generationsübergreifender Nutzung am Beispiel von Fahrzeugmodellen der Volkswagen AG (nach MACKE 2006)

3.3.3.5 Schnittstellen

Als weiteres wichtiges Element stellt KLAUKE (2002) die Importkopplung mit Fremdsystemen vor. Über einen so genannten Loader können allgemeingültige Datenformate im Comma Separated Values-Format (CSV-Format) oder XML-Format verarbeitet werden. In einer Konfigurationsdatei wird hierfür definiert, welche Daten der zu koppelnden, externen Datenbasisbasis mit welchen Daten des Planungsmodells übereinstimmen. Dieses Vorgehen wird auch als so genanntes Mapping bezeichnet und kann sowohl bei Einmalimporten, z.B. für die Migration von Daten aus Altsystemen, als auch für regelmäßige Aktualisierungen, z.B. von Produktdaten aus einem PLM-System, genutzt werden. Weiterhin stellt JONAS (2000) die Möglichkeit vor, Berechnungs- und Simulationssysteme in die Montageplanung zu integrieren. Hierbei konzentriert er sich auf Geometrie- und Ablaufsimulationssysteme, die zum Standardumfang der Produkte von Softwareanbietern der Digitalen Fabrik gehören.

Um Schnittstellen anbieten zu können, sind grundsätzlich zwei Alternativen möglich (JONAS 2000, KLAUKE 2002, MEIERLOHR 2003):

- systemneutrale bzw. -spezifische Schnittstellen
- direkte Kommunikation der beiden Systeme bzw. Datenübertragung mittels Datei

JONAS (2000) favorisiert ähnlich wie KLAUKE (2002) eine systemneutrale Schnittstelle, da hierdurch Zulieferer, wie z.B. Fabrikaurüster, mit ihren unterschiedlichen Planungssystemen aufwandsarm eingebunden werden können. Er schlägt die Übertragung der Daten mit Hilfe einer Datei vor, die zusätzlich die Möglichkeit eröffnet, Konverter einzusetzen. Hierdurch kann das Datenformat der systemneutralen Schnittstelle abhängig vom Zielsystem umgewandelt werden (vergleiche MEIERLOHR 2003). Er stellt ein Ausgabeformat vor, bei dem jede Klasse einer eigenständigen Tabelle zugeordnet wird. Ein Objekt wird hierbei jeweils durch eine Tabellenzeile repräsentiert und ist eindeutig durch seine Identifikationsnummer beschrieben. Assoziationen zu Objekten anderer Klassen werden mit Hilfe von Verweisen auf die Identifikationsnummern der Objekte in den anderen Tabellen dokumentiert. Neben den einzelnen Attributen sind die Strukturbeziehungen in Form von *Vater-Sohn*-Beziehungen sowie die Verknüpfungen zu Vorgängen vorgesehen. Diese Tabellen lassen sich in dem Microsoft Excel[®]-basierten CSV-Format abspeichern. Mit Hilfe dieser Datei ist es außerdem möglich, systemunterstützt Simulationsmodelle zusammensetzen. Der Aufbau dieser Modelle beschränkt sich allerdings auf die Erzeugung und Anordnung der Grundobjekte und die Generierung des groben Ablaufes. Detaillierte Abläufe und Steuerungsstrategien müssen in einem Folgeschritt von Simulationsexperten manuell erstellt werden. Insbesondere die Erweiterung derartiger Systeme ist ein aktueller Forschungsgegenstand, der im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

3.3.4 Erweiterungen kommerzieller Systeme

3.3.4.1 Allgemeines

In der ersten Phase der Forschung zur Digitalen Fabrik lag ein Schwerpunkt auf grundlegenden Anforderungen an integrierte Planungssysteme, wie z.B. eine hierarchische Abbildung der drei Klassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE. Weiterhin wurden prototypische, universitäre Umsetzungen, wie z.B. das System CosMonAut, realisiert. In der zweiten Phase sind auf der Basis der grundlegenden Arbeiten der ersten Phase kommerzielle Systeme bei Anwendern aus dem Automobilbereich implementiert worden (siehe Abschnitt 3.3.3).

In der dritten Phase befasst sich die Forschung überwiegend mit der Erweiterung verfügbarer, kommerzieller Systeme. So sehen FLEISCHER et al. (2004) in der Integration bestehender Informationssysteme und der Einbindung neuer Soft-

waresysteme in eine vorhandene Systeminfrastruktur die zentrale Aufgabe, um das Ziel der Digitalen Fabrik zu erreichen. Die Favorisierung der Erweiterung kommerzieller Systeme an Stelle einer universitären Neuentwicklung hat zwei Ursachen: Zum einen werden diese Systeme bei einer Vielzahl von Anwendern bereits operativ genutzt und haben dort ihre Praxistauglichkeit unter Beweis gestellt. Zum anderen bedeutet die Entwicklung derartiger Systeme einen enormen Aufwand, der kaum durch einzelne universitäre Forschungsprojekte bewältigt werden kann (ZAEH & RUDOLF 2005). In der Forschungslandschaft haben sich drei Bereiche der Erweiterung herauskristallisiert. Dies ist zum einen die Einbindung von Informationen aus dem Konstruktions- in den Planungsprozess über so genannte Features. Als zweites wird die Einbindung von Planungssystemen, wie z.B. der Ablaufsimulation, methodisch erforscht. Der dritte wichtige Bereich ist die Beherrschung von Varianten im Planungsprozess.

3.3.4.2 Features

Laut BLEY & FRANKE (2001) ist die Unterstützung in der Digitalen Fabrik im Bereich der eigentlichen Montageplanung, welche die Erstellung des Montagegraphen und der Prozessdefinition umfasst, derzeit noch als gering einzustufen. Daher hat FRANKE (2003) ein Konzept erarbeitet, das ausgehend von einem 3D-Produktmodell die Entwicklung des Montagesystems unterstützt. Hierbei geht sie davon aus, dass das Produktmodell bereits Informationen enthält, die über die reine Geometrie hinausgehen und so technologische Prozesse und Parameter für die Fertigung und Montage der Einzelteile abgeleitet werden können. Sie übernimmt die Dreiteilung in PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE, die sich nach ihrer Einschätzung in der Praxis etabliert hat und die Basis für die gängigen Softwarelösungen bildet. Für ihre weitere Umsetzung nutzt FRANKE (2003) das Datenmodell eines kommerziellen Systems, das sie zunächst mit Hilfe eines Entity Relationship Diagram, das im Anhang (siehe Abschnitt 9.3) näher erläutert wird, in seiner Struktur untersucht (vgl. Abbildung 38).

Über so genannte *Assembly Features* werden zusätzlich direkt Einzelteile mit Montageprozessen verknüpft und ein oder mehrere Prozesse ausgewählt, welche die Verbindung der Teile ermöglichen. So können ihrer Ansicht nach die Prozesselemente der Montage halbautomatisch durch die vom Nutzer selektierten Einzelteile erzeugt werden. Bei einer Abweichung von diesen standardisierten, festen Zuordnungen müssen detaillierte Parametrisierungen und Änderungen in der Reihenfolge rein manuell nachgepflegt werden.

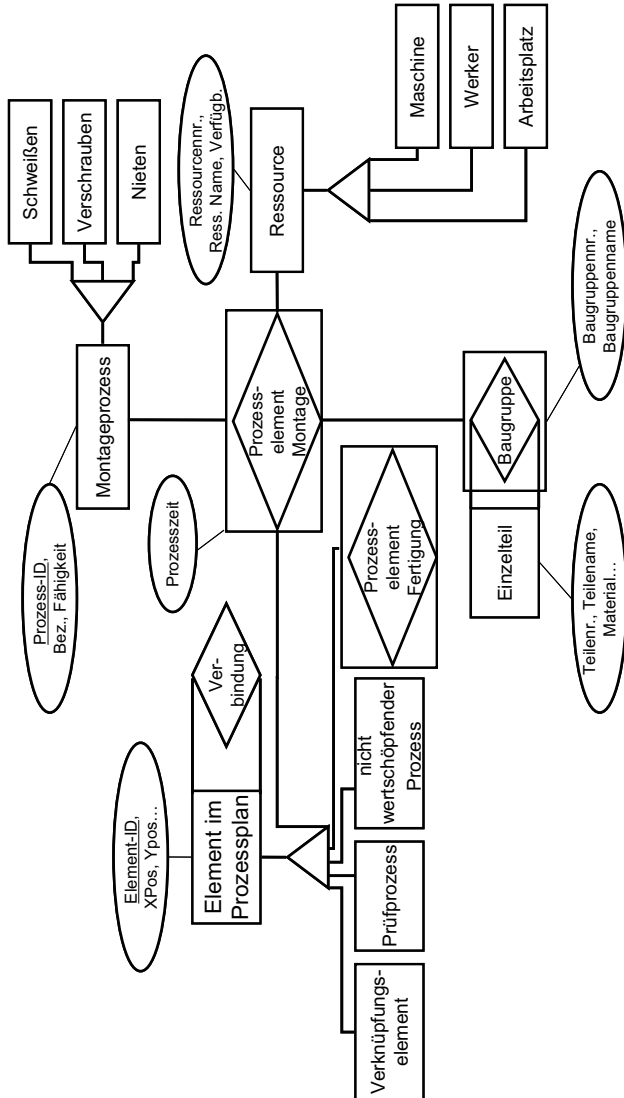


Abbildung 38: Datenstruktur des Prozessplans als Entity Relationship Diagram (nach FRANKE 2003)

Zur Umsetzung dieser Methodik sind die digitalen Planungswerkzeuge um *Assembly Features* zu erweitern. Hierzu werden diese Features als entsprechende Attribute den Einzelteilen bzw. Baugruppen zugeordnet. Durch einen Import aus einer entsprechenden Konfigurationsdatei, die im CAD-System erzeugt wird, lassen sich die entsprechend vordefinierten Felder belegen. Die Reihenfolgeanordnung der Prozesskette wird hier manuell durchgeführt. Über die Einführung der zusätzlichen Klasse ASSEMBLY FEATURE, die mit der Beziehung *besitzt* einem Einzelteil zuordnet ist, wird die Verknüpfung zu vordefinierten Standardprozessen und -ressourcen ermöglicht (siehe Abbildung 39). Auf der Basis der Parameter einzelner Assembly Features werden ein oder mehrere Montageprozesse ausgewählt, die die Verbindung der Einzelteile ermöglichen. Diese können bevorzugten Ressourcenarten zugeordnet werden, um so Standardisierungsbestrebungen zu unterstützen. Hierdurch wird es nach FRANKE (2003) möglich, Montageprozesse und -ressourcen halbautomatisch auf der Basis der vom Nutzer selektierten Einzelteile zu erzeugen.

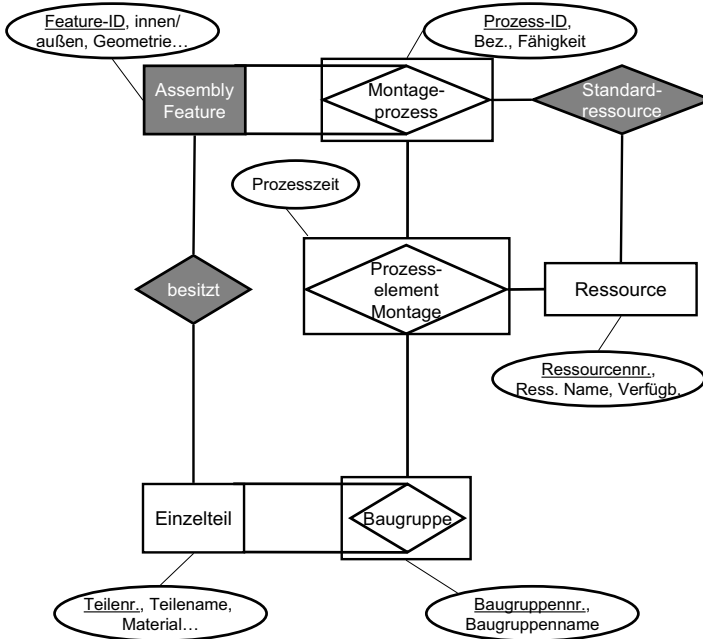


Abbildung 39: Um ASSEMBLY FEATURES erweiterte Datenstruktur des Systems DELMIA Process Engineer® (nach FRANKE 2003)

Es ist allerdings zu beachten, dass hiervon abweichende detaillierte Parametrierungen und Änderungen der Reihenfolge manuell nachgepflegt werden müssen. FRANKE (2003) führt an, dass es wünschenswert wäre, dass das Planungstool aus einem Algorithmus heraus zumindest eine erste gültige Prozessreihenfolge vorgeben würde. Als Ansatz sieht sie hierfür die Netzplantechnik, deren Anwendung in diesem Zusammenhang nicht näher detailliert wird.

3.3.4.3 Einbindung von Planungssystemen

Die Prozessplanung hat die zentrale Aufgabe einer Datendrehzscheibe. Aus diesem Grund sind verschiedene externe Planungssysteme einzubinden. Als wichtigste Werkzeuge sind in diesem Zusammenhang die Gebäudeplanung und die Ablaufsimulation zu nennen. So beschäftigt sich MEIERLOHR (2003) auf der Basis der Ergebnisse von JONAS (2000) mit der Erweiterung dessen Datenmodells um spezielle Klassen und Attribute zur Unterstützung der Gebäudeplanung. Schwerpunkt seiner Arbeit ist die Verbesserung der Weitergabe und Nutzung von bereits vorliegenden Planungsergebnissen. Ausgangspunkt ist die stärkere Berücksichtigung von Wissen und Regeln aus dem Bereich der Gebäudeplanung bereits in den frühen Phasen der Produktionssystemplanung. Neben der Wissensbereitstellung zählen erweiterte Funktionen zur Planungsunterstützung sowie eine Verbesserung des Informationsflusses von der Produktions- zur Gebäudeplanung zu den Kernpunkten des Integrationsansatzes. Hierfür entwickelt MEIERLOHR (2003) eine systemneutrale, frei konfigurierbare Schnittstelle.

Kommerzielle Anbieter, wie z.B. die Firmen UGS oder DELMIA (siehe Abschnitt 9.1 im Anhang), stellen bereits grundlegende Lösungen zur Verfügung, um ein Planungswerkzeug mit einer Ablaufsimulation zu verknüpfen. In diesem Konzept wird das Ergebnis der Prozessplanung an ein Simulationswerkzeug weitergeleitet. Dieses übersetzt die Elemente des Prozessplans in ein Modell aus vorgefertigten Bausteinen, auf deren Basis die Simulation durchgeführt wird. Mit den heute verfügbaren Tools ist es allerdings noch nicht möglich, Entscheidungsknoten für Varianten und deren Materialfluss abzubilden (FRANKE 2003). Dies wird im Detail noch unter dem speziellen Aspekt der Variantenbeherrschung beleuchtet.

Der Fokus kommerzieller Planungssysteme liegt auf Großunternehmen und dort vorrangig auf dem Automobilbau. WESTKÄMPER et al. (2003) kritisieren, dass bestehende kommerzielle Lösungen derart komplex sind, dass vor ihrer Anwendung eine mehrmonatige Schulung der Nutzer notwendig ist. Insbesondere An-

forderungen von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) werden bisher nur unzureichend abgedeckt. Diese Unternehmen müssen aufgrund zahlreicher Veränderungen, wie z.B. des Produktionsprogramms, Umplanungen während des laufenden Betriebes durchführen und diese simulativ absichern. Hierzu ist es notwendig, eine Plattform für eine Planung zu etablieren, die das Arbeiten in Gruppen unterstützt und zusätzlich die Logistiksteuerung berücksichtigt. Aus diesem Grund verfolgen KAPP et al. (2005b) im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 467 „Wandlungsfähige Unternehmensstrukturen für die variantenreiche Serienproduktion“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) einen Ansatz, bei dem drei Planungskomponenten miteinander gekoppelt werden: ein Fabrikplanungstisch, ein kommerzielles Prozessplanungssystem und ein Logistik-Prüfstand. Im Folgenden werden nur der Fabrikplanungstisch und der Prüfstand vorgestellt, da das kommerzielle Planungssystem methodisch bereits umfangreich in Abschnitt 3.3.3 beschrieben wurde.

Die bereits vorgestellten Systeme der Digitalen Fabrik werden bisher überwiegend von Experten genutzt, um für ein Planungsprojekt das Mengengerüst der Elemente PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE zu planen. Hierbei werden den Objekten vom Typ RESSOURCE auch Positionen und Orientierungen im Fabriklayout zugeordnet. Diese Aufgabe, die in den Bereich der Fabrikplanung fällt, soll in vielen Fällen allerdings in einem heterogenen Team gemeinsam übernommen werden. Aus diesem Grund wurden so genannte Planungstische entwickelt, die genutzt werden, um das Layout der Fabrik zu visualisieren und zu planen. Hierbei werden Repräsentationsobjekte von Planungselementen, wie z.B. einzelne Produktionsressourcen, auf einem ebenen Tisch verschoben, wobei das Ergebnis dieser Umplanungsumfänge direkt in einem 3D-Layout betrachtet werden kann. Für die systemtechnische Realisierung kommen verschiedene Ansätze in Betracht. Für die Umsetzung können z.B. reale Würfel auf einem Tisch verschoben werden, die von einer Kamera erkannt werden und denen die einzelnen Planungsobjekte zugeordnet sind (KAPP et al. 2005b) Alternativ existieren Systeme, bei denen der Tisch in Form eines berührungssensitiven Bildschirms realisiert wurde (WAGNER 2006b). Der Planungstisch selbst beinhaltet keine Planungslogik und dient als reines Interaktionsmedium für eine gruppenbasierte Layoutplanung. Für eine detaillierte Beschreibung des Planungstisches sei auf SCHMIDT (2002), KAPP et al. (2005b), KAPP et al. (2005a) und WAGNER (2006b) verwiesen.

Das Ziel des Logistik-Prüfstandes liegt darin, schnell und aufwandsarm logistische Prozesse abbilden zu können, um dynamische Abhängigkeiten zwischen

dem Marktverhalten, den Planungsstrategien, den Produktionskapazitäten und der logistischen Leistungsfähigkeit eines Produktionssystems aufzuzeigen (KAPP et al. 2005a). Hierzu werden die Grunddaten aus dem Prozessplanungswerkzeug importiert, um automatisch ein Simulationsmodell auf der Basis eines kommerziellen Ablaufsimulationswerkzeuges zu erstellen. Der Datenaustausch zwischen den Komponenten wird hierbei mit Hilfe von XML-Dateien und VBA-Skripten realisiert. Das komplette Datenmodell liegt in einem kommerziellen Prozessplanungswerkzeug vor und wird mit Hilfe des im SFB 467 entwickelten Enterprise Application Integration-Systems (EAI-Systems) Champagne (Change Propagation Manager) an andere Planungssysteme dateibasiert übergeben (CONSTANTINESCU et al. 2006). Neben der Kopplung von Prozessplanung und Ablaufsimulation, die bereits in Abschnitt 3.3.3 am Beispiel der Arbeiten von JONAS (2000) dargestellt wurde, liegt die Besonderheit des Ansatzes von KAPP et al. (2005b) darin begründet, dass sie das Prozessplanungswerkzeug von DELMIA (den DELMIA Process Engineer[®]) mit der Ablaufsimulation von UGS (eM-Plant[®]) über ein EAI-System verbunden haben.

Die Werkzeuge kommerzieller Anbieter sind als Insellösungen entstanden, die inzwischen dateibasiert (meist mit XML-Dateien) miteinander verbunden wurden. Dieser Ansatz kann ebenso genutzt werden, um Systeme unterschiedlicher Hersteller zu koppeln (ZAEH & RUDOLF 2005). Aus diesem Grund können mit heterogenen Planungsumgebungen vergleichbare Funktionalitäten wie mit homogenen Systemwelten eines Anbieters realisiert werden.

3.3.4.4 Varianten

BLEY et al. (2005) sehen eines der großen bisher ungelösten Probleme bei der Einführung der Digitalen Fabrik in der noch mangelhaften Umsetzung von Möglichkeiten der variantenspezifischen Planung im frühen Stadium. Sie argumentieren, dass neben einem bestehenden Variantenmanagement für Produkte auch Prozesse und Ressourcen miteinbezogen werden sollten. Bisherige Ansätze versuchen meist die Varianz zu verringern, indem diese auf späte Montageschritte verlagert wird (WIENDAHL 2004). Dieser Ansatz wird allerdings nicht als ausreichend angesehen, um zunehmend individualisierte Produkte zu planen. Aus diesem Grund argumentieren BLEY et al. (2005), dass eine konsequente Integration von Varianten in den gesamten Planungsprozess notwendig ist. Diese Anforderung wird durch das Simultaneous Engineering insofern noch weiter verschärft, als durch die Parallelisierung von Produkt- und Prozessplanung die Grobplanung der

Anlagen bereits zu einem Zeitpunkt notwendig wird, an dem Produktvarianten noch nicht in einem detaillierten Planungsstatus vorliegen. Als Lösung wurde ein Vorgehen entwickelt, bei dem die Stücklisten von Einzelvarianten zu einer Maximalstückliste zusammengefasst werden. In dieser allgemeinen Maximalstückliste verweisen Nummern auf in der Struktur tiefer liegende variantenspezifische Komponenten. Um dieses Vorgehen umzusetzen, wird auf der Basis einer Konstruktionsstückliste eine produktionsorientierte Fertigungsstückliste erzeugt. Variantenspezifische Prozessmodule erlauben es, zwischen verschiedenen Prozessvarianten und entsprechenden Prozessabläufen, abhängig von der jeweiligen Produktvariante, zu unterscheiden. Um die Verbindung zwischen Produkt und Prozess herzustellen, müssen Bauteile oder Baugruppen den entsprechenden Prozessen zugewiesen werden (siehe Abbildung 40).

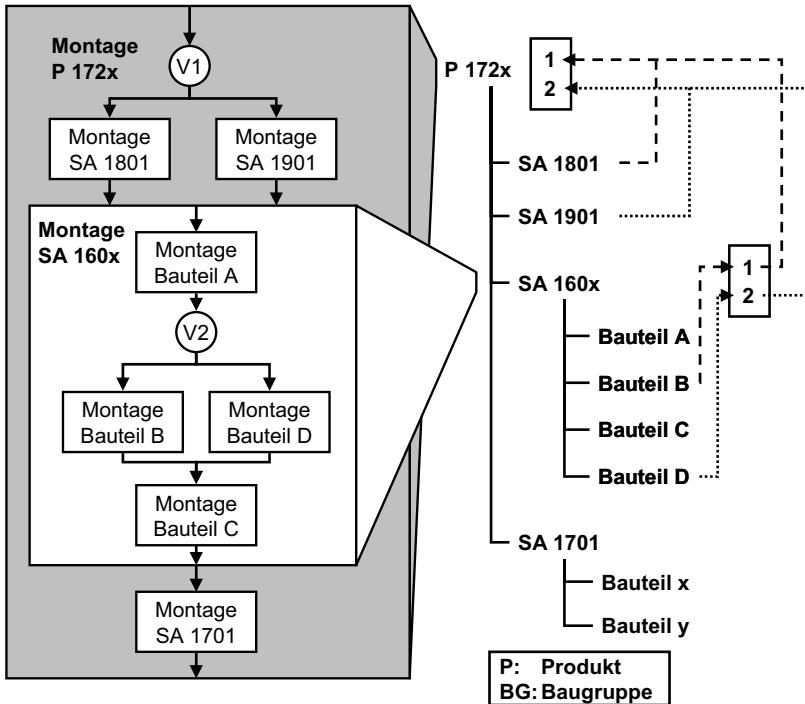


Abbildung 40: Produkt-Prozess-Relation mit Variantenkonzept (nach BLEY et al. 2005)

Diese variantenspezifischen Entscheidungsknoten sind auch erforderlich, um einen Prozessplan für Varianten in ein Simulationsmodell zu überführen, weil sie die Voraussetzung zur Abbildung der für das Simulationswerkzeug notwendigen Steuerungsstrategien darstellen (FRANKE 2003). BLEY et al. (2005) zeigen zwar relevante Probleme beim Umgang mit Varianten und eine Methode als Lösungsmöglichkeit auf, sie bieten allerdings keine umfassende systemtechnische Umsetzung an. Auf der rechten Seite der Grafik ist eine Maximalstückliste für die beiden Produkte 1721 und 1722 abgebildet. Der Unterschied zwischen den beiden Varianten ist die Baugruppe 160x, in der alternativ die Bauteile B oder D verwendet werden. Weiterhin beinhaltet 1721 die Baugruppe 1801, während 1722 die Baugruppe 1901 umfasst. Die variantenspezifischen Nummern werden hierbei durch ein x ersetzt. Um diese Informationen weiterhin verfügbar zu haben, werden sie in einer Liste gespeichert, die für spätere Abhängigkeiten ausgewertet werden kann.

3.4 Ableitung von Handlungsfeldern

Der Stand der Forschung und Technik im Bereich der Digitalen Fabrik in der Montageplanung lässt sich in die drei Bereiche grundlegende Methoden, Umsetzung in kommerziellen Systemen und deren Erweiterung einteilen, wie sie in Abschnitt 3.3 vorgestellt wurden. Es wurde gezeigt, dass bisher wissensbasierte Methoden bei kommerziellen Prozessplanungswerkzeugen nicht eingesetzt werden, obwohl sie z.B. von JONAS (2000) bei seiner Konzipierung als möglicher Ansatz für eine annähernd automatisierte Planung angesehen werden. Auch KLAUKE (2002) erwähnt Expertensysteme als hilfreiche Unterstützung der Technologieauswahl insbesondere bei der Komponentenfertigung. Die stärkere Berücksichtigung von Wissen und Regeln aus dem Bereich der Gebäudeplanung bereits in den frühen Phasen der Produktionssystemplanung wird von MEIERLOHR (2003) als zentrale Aufgabe gesehen, der er sich methodisch widmet, ohne allerdings wissensbasierte Systeme in seinen Lösungsansatz zu integrieren. Ebenso sieht FUSCH (2005) in diesen Ansätzen weit reichende Möglichkeiten, z.B. für die automatisierte Generierung eines Vorschlages für Verbaureihenfolgen. Er betrachtet derartige Systeme allerdings noch als Forschungsgegenstand, der noch eine ungenügende Umsetzungsreife aufweist.

Es wird deutlich, dass ein Großteil der im Stand der Forschung beschriebenen Arbeiten seinen Schwerpunkt auf die Planung eines Einzelproduktes legt. Die

Einbeziehung von Varianten und die Ablaufplanung für komplexere Produkte wird mit Codes realisiert, bei denen durch Filter bestimmte Elemente ausgeblendet werden. Dieses Vorgehen entspricht methodisch einer Plus-Minus-Stückliste, wie sie bereits in Abschnitt 2.4.3 vorgestellt wurde. Es können hiermit allerdings nur Strukturen mit einer mittleren Komplexität abgebildet werden. Diese Einschränkung wurde bei der Entwicklung von PLM-Systemen erkannt, weshalb dort wissensbasierte Methoden zum Einsatz kommen, wie in Abschnitt 3.2 dargestellt wurde. Die Tatsache, dass in Prozessplanungswerkzeugen neben den Produktstrukturen auch Prozesse und Ressourcen mit ihren jeweiligen Varianten, Alternativen und Beziehungen verwaltet werden, verdeutlicht, dass hier eine noch größere Komplexität als bei der bloßen Produktstrukturierung vorliegt. Die sich hieraus ergebenden Anforderungen können daher nicht mehr mit den bestehenden Methoden kommerzieller Systeme, wie sie im Stand der Technik beschrieben wurden, erfüllt werden.

Im Bereich der wissensbasierten Systeme wurde deutlich, dass mit Verfahren, die rein auf Entscheidungstabellen basieren, nur die Teilefertigung abgedeckt werden kann. Ein Grund hierfür ist, dass die alleinige Anwendung von Entscheidungstabellen im Rahmen der Montageablaufplanung nicht ausreicht, da eine Parallelisierung und Kennzeichnung von Montagetätigkeiten beispielsweise in einem Vorranggraf mit der Entscheidungstabellentechnik nur umständlich realisiert werden kann.

Die Einbindung von Features sowie weiteren Planungssystemen wurde in Verbindung mit kommerziellen Planungssystemen bereits von zahlreichen Forschern untersucht (BLEY & FRANKE 2001, WESTKÄMPER & VON BRIEL 2001, MEIERLOHR 2003, BLEY & BOSSMANN 2005, BLEY et al. 2005, BRACHT et al. 2005, CONSTANTINESCU et al. 2005, DOMBROWSKI & TIEDEMANN 2005, DROBIR 2005, KAPP et al. 2005a, KAPP et al. 2005b, WESTKÄMPER 2005, CONSTANTINESCU et al. 2006). Die Vielzahl der bestehenden Arbeiten zeigt, dass die Notwendigkeit der wissenschaftlichen Weiterentwicklung erkannt wurde und sie sich bereits entsprechend in der Umsetzung befindet. Daher soll die Einbindung von Features nicht den Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit darstellen. Weiterhin hat die Betrachtung des Standes der Technik gezeigt, dass eine Einteilung in die Grundobjekte PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE allgemein anerkannt ist. Aus diesem Grund sollen in der zu entwickelnden Methode die bereits existierenden Elemente weitgehend übernommen und für eine variantenreiche Planung erweitert werden. Laut WALTER (2002) bestehen zwischen den beiden derzeit den Markt dominierenden Systemanbietern DELMIA und UGS,

wie sie im Stand der Technik vorgestellt wurden, in Bezug auf das Versions- und Variantenmanagement kaum nennenswerte Unterschiede. WALTER (2002) kommt jedoch in einer vergleichenden Studie über Systeme der Digitalen Fabrik zu dem Schluss, dass bisher bei allen Anbietern die Realisierung eines umfassenden Variantenmanagements nur auf mittelmäßigem Niveau vorliegt. Als wichtige Ursache hierfür wird eine mangelnde methodische Unterstützung zur Repräsentation von Wissen angeführt, die sich alleine auf prozedurale Skripte, wie sie insbesondere von KLAUKE (2002) vorgestellt wurden, stützt. So ist nach KLAUKE (2002) die Kontrolle eines Attributwertes, wie z.B. die Überprüfung bei Eingaben auf bestimmte Codes, bislang nicht von den Anbietern geplant, obwohl diese Funktionalität nach WALTER (2002) einen erheblichen Nutzen für einen großen Anwenderkreis darstellen könnte. In einem stark parallelisierten Entwicklungsprozess ändern sich die Eingangsinformationen aufgrund der vorgelagerten Planungsprozesse. Daher muss es dem Planer gezielt mitgeteilt werden, wenn sich die Randbedingungen so stark verändert haben, dass eine Neuplanung von Detailbereichen notwendig wird. Nach dem aktuellen Stand der Technik ist diese Funktionalität nur insofern umgesetzt, als neue, gelöschte oder geänderte Bauteile strukturiert in Änderungsordnern abgelegt werden, der Planer allerdings ohne Systemunterstützung entscheiden muss, ob und in welcher Weise dies eine Teilumplanung notwendig macht.

Eine zentrale These dieser Arbeit ist, dass bisher das große Potenzial wissenschaftlicher Methoden durch Systeme der Digitalen Fabrik nicht hinreichend genutzt wird. Hierzu werden in der folgenden Tabelle 1 ausgewählte Arbeiten aus dem Stand der Technik im Bereich wissenschaftlicher Systeme und der Digitalen Fabrik einander gegenübergestellt. So existieren frühe Veröffentlichungen auf dem Gebiet der CAPP-Systeme, wie beispielsweise THALER (1993) oder HAMELMANN (1995), die bereits regelbasierte und objektorientierte Ansätze zur Automatisierung der Planung verwenden. Sie betrachten allerdings nur die Bereiche der manuellen Montage sowie der Teilefertigung. Eine Montagesystemplanung, wie sie in der Digitalen Fabrik ein zentrales Element darstellt, wird von ihnen nicht untersucht. Stattdessen stellen THALER (1993) und HAMELMANN (1995) die Ablaufplanung einer Montage oder Fertigung in den Mittelpunkt, was auch in der engen Anbindung an erzeugende CAD-Systeme zum Ausdruck kommt. Diese Systeme generieren mit Hilfe von Regeln neue Planungsstände. Im Gegensatz hierzu beschränken sich Entwicklungen im Bereich der Digitalen Fabrik auf Verwaltungsfunktionen, die mit prozeduralen Skripten und einer eingeschränkten Objektorientierung umgesetzt werden. So ist beispielsweise zu bemängeln, dass

keine echte Vererbungsfunktion in diesen Systemen vorliegt. JONAS (2000), KLAUKE (2002) und FUSCH (2005) begründen eine fehlende Implementierung wissensbasierter Methoden damit, dass sich ihrer Ansicht nach derartige Ansätze nur für die Teilaspekte der Planungsaufgabe in der Digitalen Fabrik eignen. Desweiteren führen sie eine mangelnde Umsetzungsreife als Hinderungsgrund für die Realisierung einer wissensbasierten Montageplanung an. Um dies zu widerlegen, sollen die Funktionalitäten bestehender Prozessplanungswerkzeuge in der vorliegenden Arbeit in einem wissensbasierten System abgebildet werden.

Dies begründet den in Tabelle 1 in der rechten Spalte dargestellten Anspruch der vorliegenden Arbeit, generierende Planungsmethoden mit wissensbasierten Repräsentationsformen für Prozessplanungssysteme der Digitalen Fabrik zu konzipieren und prototypisch zu validieren. Wie in diesem Abschnitt gezeigt wurde, sind die Funktionalität und das Datenmodell der kommerziellen Systeme von DELMIA und UGS nahezu identisch. Aufgrund des leichteren Zugriffs auf das System von UGS bei der Anfertigung dieser Arbeit wird es im weiteren Verlauf als Beispiel für ein kommerzielles Planungswerkzeug der Digitalen Fabrik verwendet. Es wird in Kapitel 4 ein Anforderungskonzept für die wissensbasierte Montageplanung entwickelt. Dieses wird in Kapitel 5 für die Entwicklung eines nicht softwarespezifischen Grobkonzeptes genutzt, welches in Kapitel 6 in einem Feinkonzept als Softwareprototyp abgebildet wird.

	Thaler (1993)	Hamelmann (1995)	Feldmann/Cuiper (2000)	Klauke (2002)	Jonas (2000)	Franke (2003)	SFB 467 (2005)	Rudolf (2006)
Planungsmethode: - Verwaltungsverfahren - Generierungsverfahren	⊕ ●	⊕ ●	● ⊕	● ⊕	● ⊕	● ⊕	● ⊕	⊕ ●
Wissensrepräsentation: - prozedural - regelbasiert - objektorientiert - constraintbasiert	⊕ ● ⊕ ⊕	⊕ ● ● ⊕	● ⊕ ⊕ ⊕	● ⊕ ⊕ ⊕	● ⊕ ⊕ ⊕	● ⊕ ⊕ ⊕	● ⊕ ⊕ ⊕	● ● ● ⊕
Schnittstellen: - CAD - PPS - Ablaufsimulation	● ⊕ ⊕	● ⊕ ⊕	● ● ⊕	● ● ⊕	● ● ●	● ⊕ ●	⊕ ⊕ ●	⊕ ⊕ ⊕
Anwendungsfall: - Einzelprodukt - Varianten - komplexes Produkt	⊕ ● ●	● ⊕ ⊕	● ⊕ ●	● ⊕ ●	● ⊕ ●	● ● ●	● ● ●	⊕ ● ●
Arbeitssystem: - automatische Montage - manuelle Montage - Teilefertigung	⊕ ● ⊕	⊕ ⊕ ●	● ● ⊕	● ● ●	● ● ⊕	● ● ⊕	● ● ⊕	● ● ⊕
Fertigungsart: - Einzel- und Kleinserie - Serie	⊕ ●	● ⊕	⊕ ●	⊕ ●	⊕ ●	⊕ ●	⊕ ●	⊕ ●
Planungssoftware:	keine	OP&S	keine	DELMIA	UGS	DELMIA	DELMIA; eM-Plant	UGS; CAPP
Softwareintegration:	nein	nein	CORBA	XML	XML	XML	XML; EAI- Eigenentwicklung	XML; kommerzielles EAI-System

- Kriterium voll erfüllt
⊕ Kriterium teilweise erfüllt
⊕ Kriterium nicht erfüllt

Tabelle 1: Stand der Forschung in der Montageplanung

4 Anforderungen an die wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik

4.1 Allgemeines

In Abschnitt 3.4 wurde als notwendiges Handlungsfeld die Umsetzung einer wissensbasierten Montageplanung abgeleitet. In diesem Kapitel sollen nun notwendige Anforderungen an eine wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik ermittelt werden. Diese bilden die Grundlage für das in Kapitel 5 bzw. Kapitel 6 zu entwickelnde Grob- bzw. Feinkonzept.

In der Produktentwicklung kann das Verständnis von funktionalen Anforderungen und deren Realisierung mit entsprechenden Konstruktionsprinzipien als Wissen bezeichnet werden. Die Modelle und Zeichnungen eines Produktes sind hierbei Teil der Produktdefinition. Sie geben allerdings nicht wieder, wie oder warum ein Produkt in einer spezifischen Weise ausgelegt wurde. Um wieder verwendbar zu sein, muss Wissen jedoch formal abgebildet werden, damit sichergestellt ist, dass später darauf zurückgegriffen werden kann (MACKRELL 2005A). Dies gilt analog zur Konstruktion ebenso für die Montageplanung. Die reine Übernahme alter Daten aus früheren Planungsprojekten oder die Verwendung von Elementen aus Standardbibliotheken, wie sie in Abschnitt 3.3.3 vorgestellt wurden, bilden nicht das komplexe Wissen ab, das in die vorherigen Planungen eingeflossen ist. Stattdessen dokumentieren sie lediglich das Planungsergebnis. In Analogie zur Arbeitsablaufplanung, wie sie im Abschnitt 2.4.2 für die Erstellung von Arbeitsplänen erläutert wurde, lässt sich dies in der folgenden Abbildung 41 für die Digitale Fabrik zusammenfassen.

Eine mögliche Planungsmethode in Form der Wiederholplanung ist die Wiederverwendung standardisierter Elemente aus einem Bibliothekskonzept. Hierbei ist der Planer allerdings auf die Verwendung von Elementen beschränkt und kann kein Beziehungswissen zwischen den Basisklassen früherer Planungsprojekte nutzen (ZAEH & RUDOLF 2005). Weiterhin ist es in einer Anpassungsplanung möglich, neue Projekte auf der Grundlage von ähnlichen Vorgängerprojekten zu planen. Hierbei wird die gesamte Struktur mit allen Beziehungen kopiert und den Anforderungen des neuen Projektes entsprechend adaptiert.

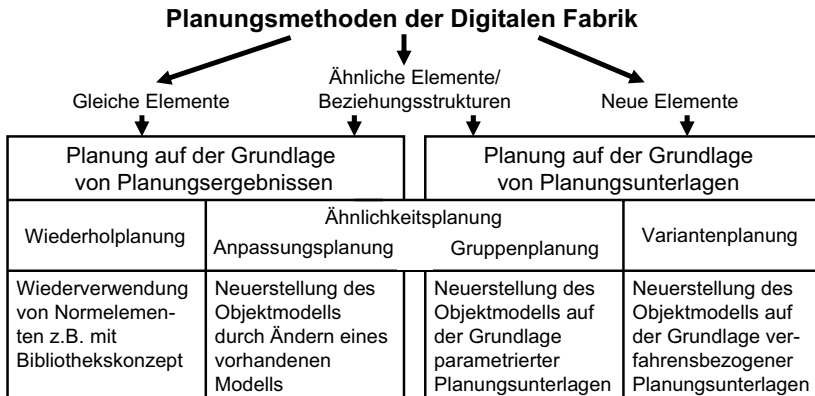


Abbildung 41: Planungsmethoden der Digitalen Fabrik

JONAS (2000) weist allerdings darauf hin, dass mit dieser Methode zwar schnell eine Objektstruktur erstellt werden kann, aber die abgebildeten Strukturen zeit- und aufwendig auf ihre Gültigkeit für das neue Projekt überprüft werden müssen.

Wie aus Abbildung 41 hervorgeht, liegt der Planung mit Planungsunterlagen ein gänzlich unterschiedliches Vorgehen zu Grunde. Es wird nicht auf die Ergebnisse vorheriger Planungen zurückgegriffen, sondern stattdessen auf Planungsunterlagen, die angeben, wie eine Projektstruktur zu erstellen ist. Diese Art der Planung ist analog zu der Erstellung von Stücklisten zu sehen, bei der auch verschiedene Methoden in Abhängigkeit von der Ähnlichkeit der Planungsobjekte zum Einsatz kommen. Die in Abbildung 41 skizzierte Gruppenplanung entspricht einer Plus-Minus-Stückliste, während die Variantenplanung einer Variantenstückliste ähnelt. Gruppenplanung bedeutet, dass es sich um ähnliche Planungsobjekte handelt, bei denen der Unterschied zum Standard leicht beschrieben werden kann. In Bezug auf die Montageplanung fallen hierunter Montageobjekte, die strukturell einander entsprechen und sich nur in speziellen Attributen, wie z.B. der Montagezeit, unterscheiden.

Über eine Gruppenplanung hinausgehend ist es mit der Variantenplanung möglich, unterschiedliche Beziehungsstrukturen abzubilden. Ähnlich wie bei einer Baugruppenstückliste werden nur Verknüpfungen zu direkt nachfolgenden, möglichen Objekten definiert. Welche dieser Elemente ausgewählt werden müssen oder dürfen, kann mit Hilfe von wissensbasierten Methoden visualisiert werden. In einer variantenreichen Produktion müssen flexible Planungsstrukturen für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle abgebildet werden können. Daher

kommt hierfür nur eine Variantenplanung in Betracht, bei der große Planungsumfänge durch Auswertungen erzeugt werden. Diese Notwendigkeit wird in der folgenden Anforderung festgehalten:

Anforderung 1: Die wissensbasierte Montageplanung muss auf einer erzeugenden Variantenplanung basieren.

In Abschnitt 3.2 wurde bereits vorgestellt, welche Grundtechniken sich für eine Variantenplanung anbieten. Dieses Thema wird nun in Hinblick auf die Montageplanung weiter vertieft.

4.2 Wissensrepräsentation in der Montageplanung

PUPPE (1991) nimmt gemäß Abbildung 42 eine Zuordnung der Problemlösungstypen Diagnostik, Konstruktion und Simulation zu Grundtechniken der Wissensrepräsentation und -verarbeitung vor. Die Konstruktion als Zusammenbau einzelner kleiner Bausteine stellt hierbei einen Syntheseprozess dar, bei dem Kundenanforderungen, Funktionen und Produktparameter miteinander in Beziehung zu setzen sind, um zum Ziel zu gelangen (HARUTUNIAN et al. 1996). Die Montageplanung ist insofern mit der Konstruktion vergleichbar, als sie sich mit der Verknüpfung der Bereiche Produkte, Prozesse und Ressourcen beschäftigt.

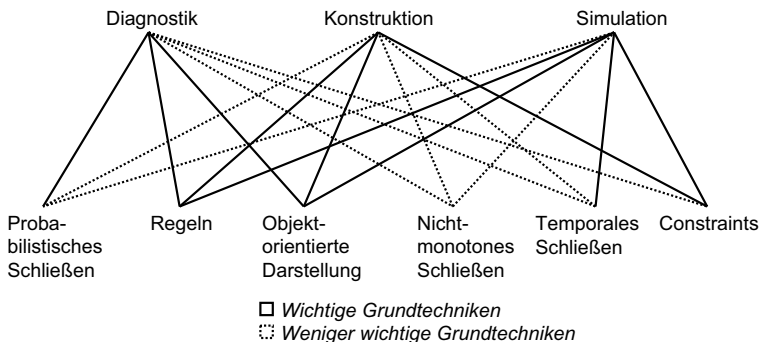


Abbildung 42: Zuordnung von Problemlösungstypen zu Grundtechniken der Wissensrepräsentation und -verarbeitung (nach PUPPE 1991)

Aufgrund der Ähnlichkeit hinsichtlich des methodischen Vorgehens bei der Produktentwicklung und der Prozessplanung sollten grundlegende Techniken übertragbar sein. Diese Überlegung wird auch durch eine Vielzahl von Arbeiten Anfang der neunziger Jahre unterstrichen, die sich mit der Anwendung wissensbasierter Systeme für die Konstruktion und die Arbeitsplanung beschäftigt haben (BULLINGER et al. 1989, MERTENS 1990, BLUMBERG 1991). Die Darstellung von PUPPE (1991) stimmt in großen Teilen mit den Funktionen der im Stand der Technik vorgestellten Systeme zum Product Lifecycle Management überein (vgl. Abschnitt 2.5.2), da bei diesen sowohl objektorientierte als auch regel- und constraintbasierte Ansätze Anwendung finden. Die gleichen Techniken werden, wie im Stand der Technik dargestellt, für CAPP-Systeme eingesetzt (vgl. Abschnitt 2.5.4).

Hieraus folgt, dass auch Prozessplanungssysteme die Techniken der objektorientierten Darstellung und zusätzlich Regeln beherrschen müssen, um insbesondere die Planung hochvariantenreicher Produktspektren zu unterstützen. Die weite Verbreitung von objektorientierten Ansätzen in der Prozessplanung spiegelt sich sowohl in einer Vielzahl wissenschaftlicher Ansätze (ELMARAGHY 1993, USHER 1999, ZHANG & ZHANG 1999, BEG & SHUNMUGAM 2002, BERNARD & PERRY 2003) als auch in kommerziellen Systemen wider (BLEY & BOSSMANN 2005, WAGNER 2006a). Bei den kommerziellen Systemen beschränkt sich allerdings die Umsetzung der Objektorientierung auf die in Abschnitt 2.6.2.3 vorgestellte Partonomie. Eine Taxonomie, die eine strukturierte Vererbung von Merkmalen und Beziehungswissen ermöglicht, wie sie insbesondere für die Beherrschung einer hohen Variantenvielfalt notwendig ist, wurde in diesen Ansätzen allerdings bisher nicht realisiert. Insbesondere die sich aus der Taxonomie ergebende Möglichkeit der Vererbung ist ein notwendiges Hilfsmittel, um Wissen strukturiert abbilden zu können und damit eine spätere Wartbarkeit von Systemen sichzustellen. Hieraus leitet sich direkt die nächste Anforderung ab:

Anforderung 2: Es müssen die Grundtechniken der Objektorientierung unterstützt werden.

Eine wissensbasierte Planung beruht auf dem Generierungsprinzip, bei dem auf der Basis von Einflussparametern ein Ergebnis mit Hilfe des hinterlegten Wissens erzeugt wird. Die Praxistauglichkeit dieser Ansätze konnte schon für das Variantenmanagement in PLM-Systemen sowie für die Arbeitsplangenerierung

mit CAPP-Systemen nachgewiesen werden. Wissensbasierte Systeme, die z.B. Regeln verwenden, haben zwar eine lange Tradition in der wissenschaftlichen Erforschung von Prozessplanungssystemen (KÖHLER 1989, MERTENS 1990, ELMARAGHY 1993, LEE & KWON 1995, JIANG & YAN 2003, ZAEH & RUDOLF 2003), wurden aber bisher nicht umfassend in kommerzielle Systeme der Digitalen Fabrik mit einer zentralen Datenhaltung überführt.

Verknüpfungen von Objekten, wie sie bei bestehenden Systemen der Digitalen Fabrik statisch in Form von Hierarchie- oder Vorrangverknüpfungen sowie Beziehungen zwischen Basisentitäten modelliert werden, sollen in der wissensbasierten Montageplanung dynamisch in Abhängigkeit von der Auswertung bestimmter Bedingungen ermittelt werden. Dieser Ansatz ist mit der Parametrik zu vergleichen, deren Einsatz sich bisher in der Digitalen Fabrik auf die CAD-Geometrien der Ressourcen bzw. des Produktes beschränkt. Als Grund hierfür wird von ZAEH & RUDOLF (2005) gesehen, dass sich die Verwendung wissensbasierter Methoden im Umfeld der CAD-Anwendungen deutlich stärker etablieren konnte als in der Arbeitsplanung. Im Umfeld von Prozessen ist heute noch keine Parametrik verfügbar, obwohl sie eine entscheidende Rolle bei der Beherrschung von Varianten spielen kann. So besteht die Möglichkeit, den Planer bei der Verbindung von Produkt- und Prozessdaten erheblich zu entlasten, da der Austausch von Daten zwischen CAD- und Prozessplanungssystemen einen großen Nutzen verspricht. Auf diese Weise könnte zum Beispiel der Auswahlprozess bei der Wahl von Werkzeuggeometrien unterstützen werden.

Wie in Abschnitt 2.6.2 erläutert, liegt die Ursache der bisher geringen Nutzung wissensbasierter Ansätze in der mangelnden Mächtigkeit von Regeln bezüglich der Abbildung von Wissen begründet. Daher muss die im Rahmen der vorliegenden Arbeit zu entwickelnde Methode eine Vielzahl der in Abschnitt 2.6.2 vorgestellten Repräsentationsformen unterstützen. Dies wird in der folgenden Anforderung festgehalten:

Anforderung 3: Es müssen unterschiedliche Formen der Wissensrepräsentation unterstützt werden, die in Abhängigkeit von der konkreten Aufgabenstellung verwendet werden.

4.3 Systemtechnische Umsetzbarkeit der Methode

Obwohl in der Forschung eine Vielzahl an wissenschaftlichen Prototypen für die Prozessplanung entwickelt wurde (ZHANG & ALTING 1994), konnte sich bis heute kein einheitlicher Standard etablieren. Ein Grund hierfür ist unter anderem, dass die Prozessplanung eine sehr fallspezifische Aufgabe ist, was letztlich auch in der Notwendigkeit einer umfangreichen Anpassung kommerzieller Systeme an die Belange des sie nutzenden Unternehmens zum Ausdruck kommt. Die zu entwickelnde Methode wird bisher von kommerziellen Systemen der Digitalen Fabrik nicht unterstützt. Dennoch sollte bei ihrer Entwicklung darauf geachtet werden, dass sie mit heute am Markt verfügbaren Systemen, wie z.B. PLM- oder CAPP-Systemen, realisiert werden kann. Die Gründe hierfür sind die folgenden (ZAEH & RUDOLF 2005):

- Es dauert oftmals Jahre, um ein Prozessplanungssystem für eine einzelne Fertigungstechnologie (wie z.B. das Fräsen oder das Biegen) zu entwickeln. Durch die notwendige Erweiterung um eine Vielzahl von unterschiedlichen Technologien wird diese Problematik noch weiter verschärft.
- Jeder zukünftige Nutzer eines Prozessplanungssystems hat seine eigenen speziellen Anforderungen.
- Es findet eine ständige Weiterentwicklung sowohl in der Fertigungstechnik als auch der Informatik statt, die dazu führt, dass die Prozessplanungssysteme bereits nach kurzer Zeit veraltet sind.
- Prozessplanungssysteme sind nicht isoliert zu betrachten, sondern immer in entsprechende PLM- und ERP-Systeme zu integrieren.

Aus diesen Punkten leitet sich die zentrale Forderung nach der Nutzung von Standards und kommerziell verfügbaren Systemen ab, wie sie bereits in Abschnitt 2.6 vorgestellt wurden:

Anforderung 4: Bei der Entwicklung der Methode muss bereits deren Umsetzbarkeit mit heute am Markt verfügbaren Systemen berücksichtigt werden.

Auf der Grundlage dieser Anforderungen wird in den folgenden Kapiteln 5 und 6 ein Konzept erarbeitet und dessen prototypische Umsetzung beschrieben.

5 Grobkonzept für die wissensbasierte Montageplanung

5.1 Allgemeines

Ein Ziel dieser Arbeit liegt in der Validierung der Hypothese, dass komplexe Planungen von Produkten, Prozessen und Ressourcen in der Digitalen Fabrik mit Hilfe von wissensbasierten Systemen abgebildet werden können und über bestehende Funktionen hinausgehend ein Zusatznutzen für den Planungsmitarbeiter generiert werden kann. Um dies zu belegen, ist es zunächst notwendig, ein Konzept zur Umsetzung der wissensbasierten Montageplanung zu erarbeiten. Dieses soll, wie in Abschnitt 4.2 gefordert, die Planung auf der Basis von Planungsunterlagen ermöglichen und sich damit von heute bestehenden Ansätzen der Digitalen Fabrik abgrenzen, die lediglich eine Planung auf der Grundlage von Planungsergebnissen aus der Vergangenheit unterstützen. Das Hauptanwendungsgebiet liegt in der Planung von variantenreichen Produkten, Prozessen und Ressourcen, da hier die Vorteile, die sich aus der gezielten Weitergabe von Erfahrungen mit wissensbasierten Systemen ergeben, besonders deutlich werden.

Im vorhergehenden Kapitel 4 wurden vier zentrale Anforderungen an die wissensbasierte Montageplanung definiert:

1. Die wissensbasierte Montageplanung muss auf einer erzeugenden Variantenplanung basieren.
2. Es müssen die Grundtechniken der Objektorientierung unterstützt werden.
3. Es müssen unterschiedliche Formen der Wissensrepräsentation unterstützt werden, die in Abhängigkeit von der konkreten Aufgabenstellung verwendet werden.
4. Bei der Entwicklung der Methode muss bereits deren Umsetzbarkeit mit heute am Markt verfügbaren Systemen berücksichtigt werden.

Die Anforderung 1 bis 3 werden von den in Abschnitt 3.3.3 vorgestellten kommerziellen Systemen nicht erfüllt. Dennoch muss für die Umsetzung der wissensbasierten Montageplanung ermittelt werden, welche Grunddaten aus diesen Systemen im Rahmen einer erzeugenden Planung genutzt werden können. Anforderung 4 legt fest, dass die wissensbasierte Montageplanung mit bereits ver-

fürbaren Systemen durchgeführt werden kann, um eine Umsetzbarkeit prototypisch validieren zu können, ohne eine komplette Systemneuentwicklung durchführen zu müssen. Diese Forderung lässt sich dahingehend noch erweitern, dass gewährleistet sein soll, dass die Grunddaten bestehender Planungen übernommen werden und als Planungsbasis dienen können. Hierdurch soll gezeigt werden, dass bestehende Planungssysteme mit ihren Grunddaten bei gleicher Funktionalität ohne das Hinterlegen von zusätzlichen Informationen durch wissensbasierte Methoden und Systeme ersetzt werden können. Des Weiteren soll belegt werden, dass derartige wissensbasierte Systeme erhebliche Vorteile durch die Nutzung von Planungsunterlagen anstelle von Planungsergebnissen bieten. Das hierfür notwendige Gesamtkonzept ist in Abbildung 43 grafisch skizziert.

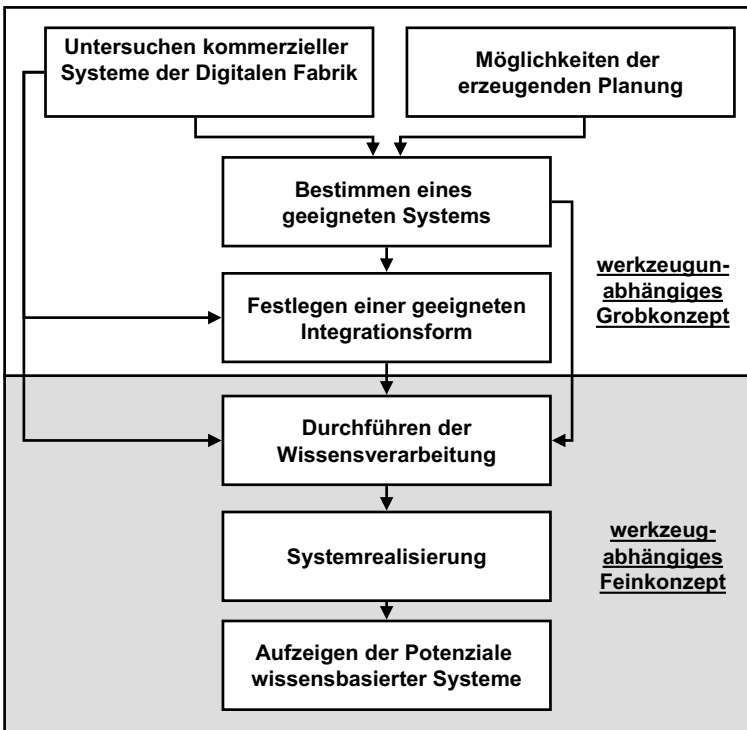


Abbildung 43: Gesamtkonzept zur Umsetzung einer wissensbasierten Montageplanung

Das Gesamtkonzept gliedert sich in ein werkzeugunabhängiges Grob- und ein werkzeugabhängiges Feinkonzept. Das Gesamtkonzept ist somit bis zur Wissensverarbeitung allgemeingültig angelegt. Ab da ist es stark werkzeugspezifisch abhängig vom ausgewählten Softwaresystem zu adaptieren. Dieser zweite Teil wird daher erst in Kapitel 6 allgemein und in seiner Umsetzung vorgestellt. In Abschnitt 5.2 wird untersucht, wie kommerzielle Systeme der Digitalen Fabrik Variantenplanungen auf der Basis von verwaltenden Funktionen unterstützen. Weiterhin wird in Abschnitt 5.3 erörtert, wie eine wissensbasierte Montageplanung ein erzeugendes Verfahren unterstützen kann. Mit Hilfe dieser beiden Vorarbeiten gilt es, einen Anforderungskatalog an ein geeignetes Werkzeugkonzept für die wissensbasierte Montageplanung zu entwickeln. Auf der Basis dieses Konzeptes sowie den Erkenntnissen aus der Untersuchung der kommerziellen Systeme der Digitalen Fabrik wird erarbeitet, wie diese Daten in das ausgewählte Werkzeugkonzept zu überführen sind.

Die Umsetzung der Wissensverarbeitung hängt maßgeblich von dem gewählten Softwarewerkzeug ab. Daher erfolgt die Umsetzung der Wissensverarbeitung, die Systemrealisierung und das Aufzeigen zusätzlicher Potenziale in Kapitel 6. Hierbei wird ein prototypisches System umgesetzt, das die bestehenden Funktionalitäten kommerzieller Systeme mit Hilfe wissensbasierter Methoden abbilden kann. Außerdem werden zusätzliche Potenziale aufgezeigt, die durch eine wissensbasierte Montageplanung mit einem generierenden Vorgehen eröffnet werden.

5.2 Wissensrepräsentation in kommerziellen Systemen der Digitalen Fabrik

Es wird zunächst die aktuelle Umsetzung einer Variantenplanung am Beispiel eines einfachen Schulungsmodells im kommerziellen System eM-Planner[®] vorgestellt. Wie bereits in Abschnitt 3.3.3.4 erläutert wurde, wird eine Planung in den meisten Fällen mit einer verwaltenden Bibliotheksstruktur unterstützt. In dieser werden einzelne Ordner für Elemente der Produkt-, Prozess- sowie Ressourcenbibliotheken angelegt. In der Produktbibliothek ist für jedes im Planungsprojekt verwendete Bauteil ein zentraler Prototyp hinterlegt. Falls ein Bauteiltyp mehrmals im Projekt verwendet wird, muss er auf diese Weise nur einmal in der Bibliothek erstellt werden. Die Prozessbibliothek enthält somit vorgegebene Pro-

zessschritte, die unter verschiedenen übergeordneten Kriterien zusammengefasst werden können.

Die Ressourcenbibliothek kann ebenfalls über eine Baumstruktur aufgebaut werden, indem die vorhandenen Ressourcen beispielsweise in Maschinen, Vorrichtungen oder Arbeitskräfte untergliedert werden. Wie bereits erläutert, werden durch die Selektion eines Elements in einem zusätzlichen Fenster die jeweiligen Eigenschaften angezeigt. Dort lassen sich auch beispielsweise Werte für Prozesszeiten und Kostensätze sowie Materialdaten hinterlegen.

Bestehende kommerzielle Systeme beschränken sich auf die rein hierarchische Beziehung der Partonomie, wie sie in Abschnitt 2.6.2 vorgestellt wurde. Der jeweilige Objekttyp wird aus einer vorher definierten Reihe von Basiselementen, wie z.B. Linie oder Arbeitsstation, ausgewählt und zu einer Gesamtstruktur zusammengesetzt (siehe Abbildung 44).

Auch sehr ähnliche Elemente der drei Klassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE, die sich nur durch einen Wert eines spezifischen Parameters, wie z.B. die spezifische Länge eines Bauteils, unterscheiden, müssen als zwei unterschiedliche Varianten abgebildet werden. Die Übernahme bestehender Parametrik aus dem Konstruktionsprozess ist hier nicht vorgesehen. Ausgehend von diesen Bibliotheken erfolgt die Definition der Produkt-, Prozess- und Ressourcenstrukturen. Die für den Montageprozess erforderlichen Elemente werden hierbei per Drag & Drop, also mit einfachem Mausclicks und Oberflächenfunktionen, aus den jeweiligen Bibliotheken in den entsprechenden Strukturbaum gezogen.



Abbildung 44: Partonomie in der Digitalen Fabrik am Beispiel des eM-Planner®

Abbildung 45 visualisiert, dass die Erzeugung von Produktvarianten durch die Definition so genannter Variantencodes und Variantenfilter erfolgt. In dem skizzierten Beispiel wird ein Filter auf eine Maximalstruktur angewendet, der aus zwei Variantencodes besteht.

Hierbei werden alle Bauteile, denen andere Codes als die im Filter enthaltenen zugeordnet sind, ausgeblendet. Bei der Nutzung von Variantenfiltern nimmt die Übersichtlichkeit mit steigender Anzahl an Varianten und Hierarchieebenen deutlich ab. Gleichzeitig bedeutet das notwendige, manuelle Zuweisen von Variantencodes zu Produkten, Prozessen und Ressourcen einen hohen Aufwand für den Planer bei der Erstellung der initialen Planungsstruktur (siehe Abschnitt 3.3.3).

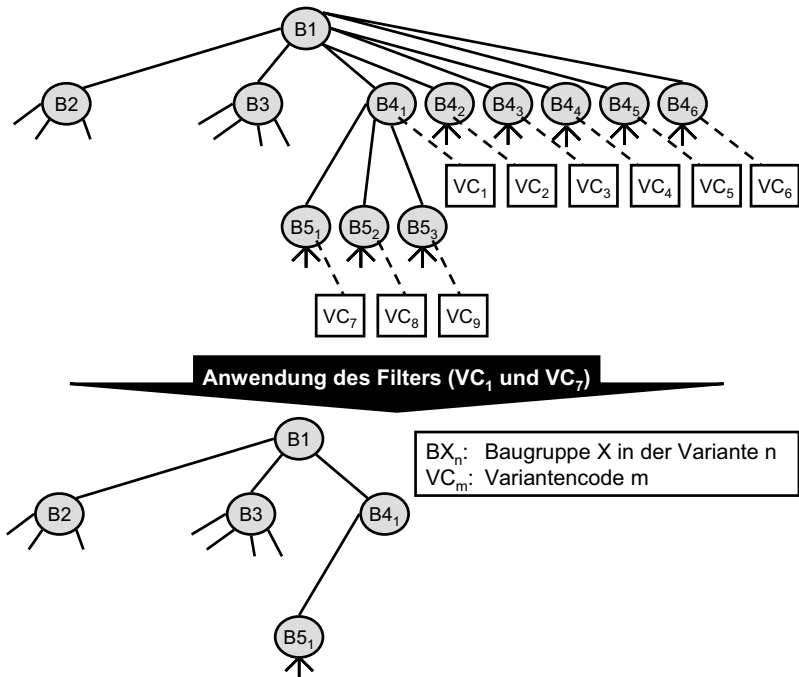


Abbildung 45: Ermittlung einer variantenspezifischen Baugruppe mit Hilfe von Variantencodes

Für die systemtechnische Umsetzung im eM-Planner[®] müssen zunächst Variantenfilter mit Hilfe des Variantensatzeditors definiert werden. Dies ist in der nachfolgenden Abbildung 46 beispielhaft dargestellt.



Abbildung 46: Definition eines Variantensatzes im Variantensatzeditor am Beispiel des eM-Planner[®]

Im oberen Teilbereich des Variantensatzeditors werden die zur Auswahl stehenden Kriterien mit ihren möglichen Werten angezeigt. Diese müssen in einem vorbereitenden Schritt extern in einer Datei hinterlegt werden, die anschließend in das Projekt zu importieren ist. Der für die Erstellung erforderliche Programmcode wird hierbei in einer CSV-Datei erzeugt und als XML-Datei in den eM-Planner[®] eingelesen. Es besteht somit ein hoher Erstellungsaufwand für Varianteninformationen, die nur in externen Systemen, wie z.B. Microsoft Excel[®], erzeugt werden können und in das Planungssystem importieren werden müssen. Dies verdeutlicht, dass das Anlegen von Varianteninformationen keine wiederkehrende, tägliche Aufgabe für den einzelnen Planer darstellt, sondern meist nur einmalig zu Beginn eines Planungsprojektes durchgeführt werden muss. Durch Auswahl der vorher importierten Kriterien und Werte wird im unteren Bereich des Variantensatzeditors ein logischer Ausdruck erstellt. Hierbei ist eine beliebige Kombination von unterschiedlichen Kriterien und Werten möglich. Der erzeugte logische Ausdruck wird hinter dem Variantensatz abgebildet und stellt somit Informationen über dessen Inhalt zur Verfügung. Der definierte Variantensatz kann anschließend als Variantenfilter gespeichert werden. Die einzelnen Objekte in den Produkt-, Prozess- und Ressourcenstrukturen, die nur für eine spezifische Variante notwendig sind, werden mit Hilfe eines Variantenfilters realisiert.

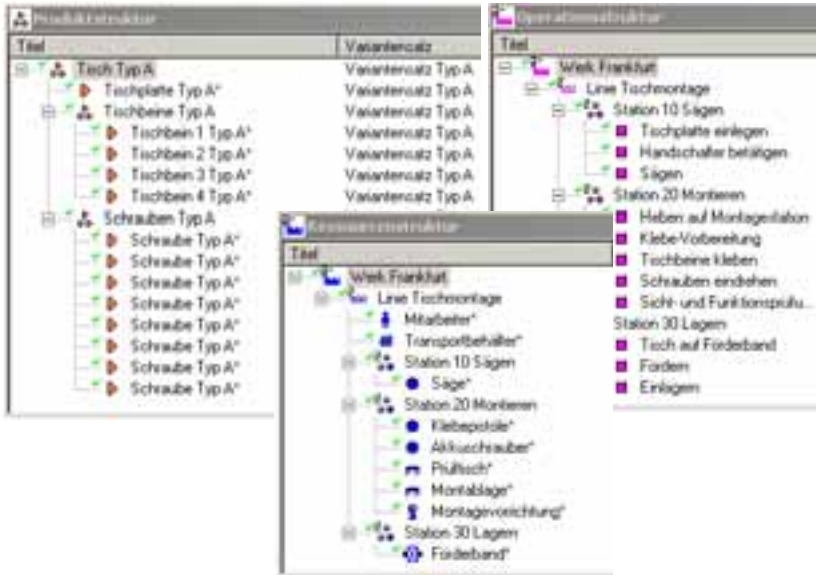


Abbildung 47: Variantenbehaftete Produkt-, Prozess- und Ressourcenstruktur am Beispiel des eM-Planner®

Den einzelnen Produkt-, Prozess- und Ressourcenelementen werden, wie in Abbildung 47 für das Produkt zu sehen ist, entsprechende Variantensätze zugeordnet. Wenn der Variantenfilter auf das Projekt angewandt wird, werden alle Elemente herausgefiltert, die mit einem anderen Variantensatz verbunden sind. Die Verknüpfung zwischen den drei Basisklassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE erfolgt in der Netzplanansicht der Prozessstruktur. Dort wird die logische Abfolge der Montageprozesse für die unterschiedlichen Varianten definiert. Weiterhin können über Drag & Drop die in den Produkt- bzw. Ressourcenstrukturen hinterlegten Bauteile und Baugruppen sowie die erforderlichen Arbeitsmittel den einzelnen Prozessen zugeordnet werden. Abbildung 48 zeigt beispielhaft die Netzplanansicht einer Montagelinie mit ihren untergeordneten Stationen für eine spezifische Variante. Die Prozesse werden in Form von Feldelementen visualisiert, welche über Pfeile miteinander verbunden werden können. Mit Hilfe der erstellten Verbindungen lässt sich so der Prozessablauf festlegen. Benötigte Arbeitsmittel werden aus der Ressourcenstruktur heraus auf das ausgewählte Feldelement gezogen und auf diese Weise mit ihnen verknüpft.

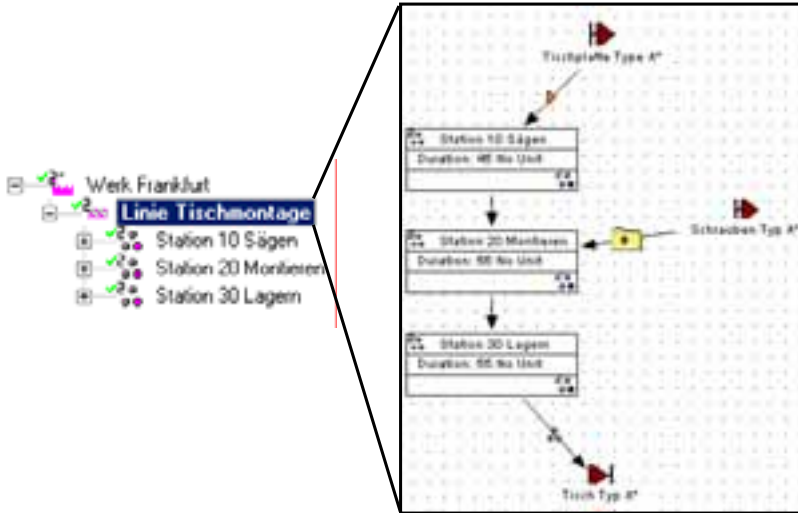


Abbildung 48: Netzplanansicht für ein einfaches Planungsszenario am Beispiel des eM-Planner®

In der untersten Zeile erscheint daraufhin das entsprechende Symbol des zugeordneten Objektes. Für die in den Prozess ein- bzw. ausgehenden Bauteile und Baugruppen werden Quellen bzw. Senken definiert. Diese werden von außen über Pfeile mit der jeweiligen Operation verbunden. Wie aus Abbildung 47 ersichtlich, beinhaltet die Station 20 in Abhängigkeit von der zu montierenden Produktvariante unterschiedliche Prozesse. Um zu einer variantenspezifischen Prozessfolge zu gelangen, müssen daher neben Produkten, Prozessen und Ressourcen auch die Verbindungspfeile zwischen den einzelnen Elementen mit dem entsprechenden Variantensatz verbunden werden. Die von FRANKE (2003) geforderten und in Abschnitt 3.3.4 vorgestellten variantenspezifischen Entscheidungsknoten werden auf diese Weise vom eM-Planner® mit der Methode des Variantensatzfilters realisiert. Es muss allerdings manuell sichergestellt sein, dass die entsprechenden Variantensätze den richtigen Produkt-, Prozess- und Ressourcenvarianten zugeordnet sind. Das Ergebnis der Anwendung eines derartigen Filters ist in Abbildung 49 illustriert.

Das hier vorgestellte Planungsverfahren entspricht methodisch einer Plus-Minus-Stückliste. Es werden bestimmte Minus-Elemente, die mit Variantensätzen verbunden sind, welche nicht im gewählten Filter enthalten sind, in Bezug auf eine Grundstückliste ausgeblendet. Wie bereits bei der Plus-Minus-Stückliste (siehe

Abschnitt 2.4.3.2) erläutert, eignet sich diese Methode allerdings nur für einfache Abbildungen mit einer geringen Anzahl an Varianten.

Als weiterer Schwachpunkt ist zu sehen, dass Elemente, die unterschiedliche Attributwerte besitzen, auch jeweils als eigenes Objekt anzulegen sind. Wenn sich beispielsweise die Prozesszeit in Abhängigkeit von der Variante ändert, müssen folglich zwei unterschiedliche Prozesse mit jeweils verschiedenen Zeiten angelegt und über einen Variantensatz zugeordnet werden. Ein ähnlicher Kritikpunkt liegt in der fehlenden Möglichkeit, parametrische Produktdaten zu übernehmen und diese direkt auf die Planung anwenden zu können. Stattdessen müssen hierbei unterschiedliche Produkte abgebildet und über den Variantensatz zugeordnet werden.

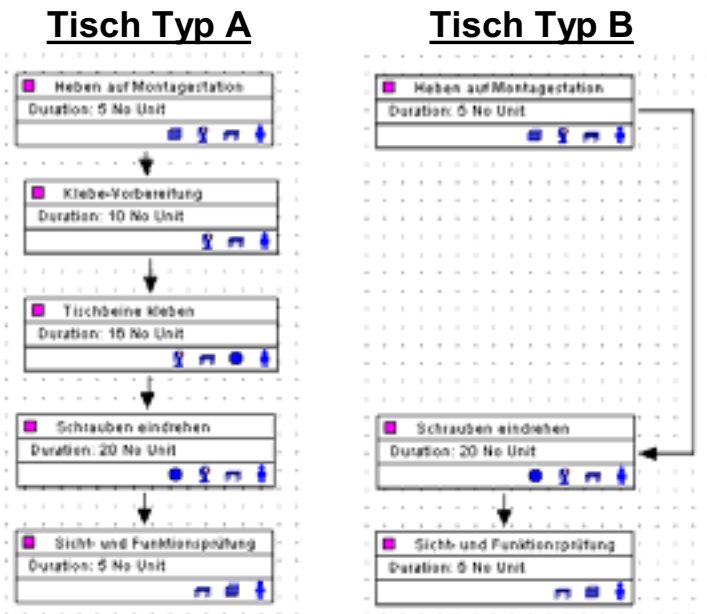


Abbildung 49: Prozesse der Station Montieren bei unterschiedlichen Produktvarianten am Beispiel des eM-Planner®

In der wissensbasierten Montageplanung sollen alle Funktionen kommerzieller Systeme verfügbar sein und darüber hinaus weitere Vorteile realisiert werden können. Die wichtigsten sind in Abbildung 50 exemplarisch am Beispiel der Klasse WERK FRANKFURT und ihrer Kindelemente dargestellt.

Entsprechend Abbildung 50 ergeben sich folgende Funktionen:

1. Die Modellierung von hierarchischen Strukturbeziehungen innerhalb der Basisklassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE sowie von Zuordnungen zu anderen Klassen
2. Die Modellierung von zeitlichen Abhängigkeiten zwischen Prozessen
3. Die Zuordnung von Variantencodes zu Elementen und das gezielte Erzeugen variantenspezifischer Planungen

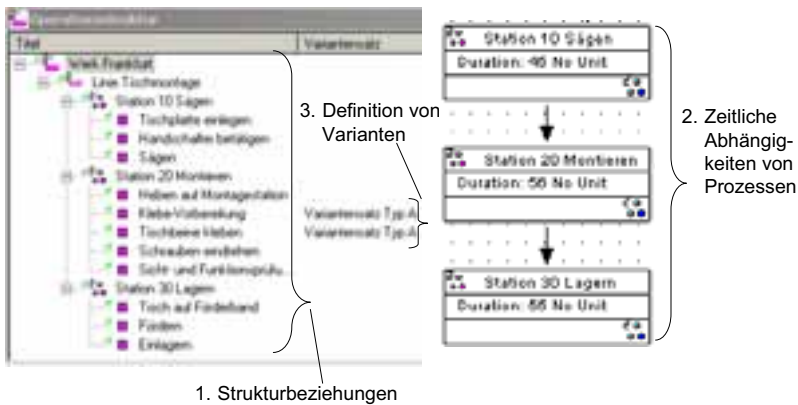


Abbildung 50: Hauptfunktionen kommerzieller Systeme der Digitalen Fabrik am Beispiel des eM-Planner®

5.3 Wissensbasierte Montageplanung

5.3.1 Allgemeines

Um eine hohe Varianz im Planungsspektrum zu unterstützen, ist die beschriebene Methode kommerzieller Planungssysteme zur Variantenplanung, die strukturell auf einer Plus-Minus-Stückliste und prozeduralen Skripten basiert, nicht mehr

ausreichend. Aus diesem Grund werden im Folgenden entsprechende Anforderungen ermittelt und deren Erfüllung mit Hilfe von wissensbasierten Ansätzen veranschaulicht.

Gemäß Anforderung 1 soll die wissensbasierte Montageplanung auf einer erzeugenden Variantenplanung basieren. Um dieser Anforderung zu genügen, müssen entsprechende Strukturbeziehungen konfiguriert werden können. Dies bedeutet, dass ähnlich wie bei PLM-Systemen eine konkrete Produktvariante fallspezifisch auf der Basis einer Masterstruktur abgeleitet wird. Hierzu ist ein Programmbaustein notwendig, der zum einen im Dialog mit dem Montageplaner und dem zugeordneten System die Kriterien, wie z.B. eingehende Bauteile oder den gewünschten Automatisierungsgrad der Montageanlage, festlegt. Zum anderen müssen die Regeln und Auswahlobjekte der Masterstruktur mit Auswahlkriterien in Form von Eingabeparametern versehen werden.

Die der Planung zugrunde liegende Produktstruktur soll somit Regelobjekte enthalten, die definieren, welche Unterbaugruppen und Bauteile einer Baugruppe in Abhängigkeit bestimmter Eingangsparameter zugeordnet werden. Das hierdurch abgebildete Beziehungswissen geht dabei insofern über eine reine Filterfunktion weit hinaus, als komplexe Beziehungen zwischen Elementen abgebildet werden können. Ein typisches Beispiel hierfür ist die Konfiguration eines Fahrzeuges, bei der ein Kunde z.B. einen Dieselmotor auswählt. Dass im Hintergrund hierdurch auch ein anderer Batterietyp ausgewählt werden muss und auch ausgewählt wird, ist im Beziehungswissen zwischen den einzelnen Komponenten hinterlegt und wird vom Bediener des Konfigurators nicht wahrgenommen. Um ein solches Beziehungswissen für die Montageplanung aufzubauen, müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

- Initiale Erzeugung von Strukturbeziehungen und Reihenfolgen auf der Basis von Merkmalswerten
- Sicherstellung der objektübergreifenden Konsistenz

Im nächsten Abschnitt wird erläutert, mit welchen Methoden diese Anforderungen mit Hilfe von wissensbasierten Systemen realisiert werden können.

5.3.2 Erzeugung von Strukturbeziehungen und Reihenfolgen

In der Digitalen Fabrik werden für die drei Basisklassen jeweils hierarchische Bäume top-down für Produkte, Prozesse und Ressourcen manuell definiert. Im

Gegensatz zu einer Plus-Minus-Stückliste soll bei der wissensbasierten Variantenplanung die Partonomie über eine Baukastenstückliste mit Regelementen realisiert werden. Als Beispiel hierfür dient eine exemplarische Struktur, wie sie bereits in Abschnitt 5.1 für eine Baugruppe mit Hilfe einer Filterfunktion umgesetzt wurde. Das gleiche Beispiel lässt sich mit wissensbasierten Methoden durch ein sukzessives Auswerten von Regeln an Stelle der Anwendung eines Filters erzielen. Die Nutzung wissensbasierter Methoden in Form von Regeln ist in Abbildung 51 skizziert. Bei dieser Methode enthält ein Objekt jeweils nur das Beziehungswissen zu seinen direkten, möglichen Kindelementen, wodurch eine größere Übersichtlichkeit und bessere Wartbarkeit bei einer großen Anzahl an Varianten erreicht werden kann. Ein weiterer Vorteil der Anwendung der Baukastenstückliste besteht darin, dass Baugruppenelemente, die nicht ausgewählt werden, auch nicht ausgewertet werden müssen.

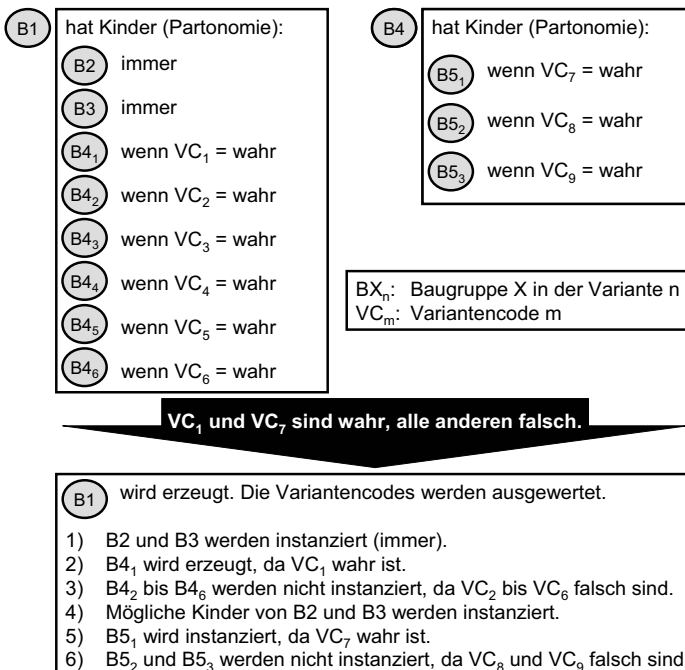


Abbildung 51: Ermittlung einer variantenspezifischen Baugruppe mit Hilfe einer Regelauswertung in einem wissensbasierten System

Da in den Datenmodellen der Digitalen Fabrik Prozesse und Ressourcen analog zu Produkten aufgebaut sind (vgl. Abschnitt 3.3.3), lässt sich diese Methode direkt auf sie übertragen. Um Wissen in den einzelnen Objekten umfassend verwalten zu können, ist neben der beschriebenen Partonomie auch eine Taxonomie notwendig. Dies garantiert, dass die Vererbung von Attributen und Methoden als zentrales Merkmal objektorientierter Systeme genutzt werden kann. Hierdurch wird es möglich, Eigenschaften und Beziehungen in abstrakten Objekten einmalig zu definieren und diese strukturiert an abgeleitete Objekte weiterzugeben. Anders als bei bisherigen Ansätzen der Digitalen Fabrik wird hierbei kein Bibliothekskonzept, sondern ein Klasse-Instanz-Ansatz verfolgt. Dies wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch näher ausgeführt.

Im Gegensatz zu Produkten, die nur hierarchisch geordnet sind, gilt es bei Prozessen deren zeitlich untereinander bestehende Abhängigkeiten in Form einer Vorgänger-/Nachfolgerbeziehung darzustellen (siehe Abschnitt 5.2). Hier können je nach Anzahl der Nachfolgeelemente sowohl sequentielle als auch parallele Folgen abgebildet werden. Diese Abhängigkeiten können über das Listenattribut *Nachfolger* realisiert werden. Bei normalen, sequentiellen Folgen wird jedem Vorgang genau ein Nachfolger zugewiesen, bei einer anschließenden Parallelfolge werden alle Nachfolger in eine Liste eingetragen.

5.3.3 Sicherstellung der objektübergreifenden Konsistenz

Ein weiterer, zentraler Aspekt besteht in der Abbildung der Beziehungen zwischen Objekten der Klassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE sowohl innerhalb der jeweiligen Klassen als auch klassenübergreifend. Als Beispiel für klassenübergreifende Abhängigkeiten ist die Einzelzeit eines Prozesses zu nennen, die z.B. durch bestimmte Attribute des Produktes, aber auch durch Attribute von Ressourcen beeinflusst werden kann. Ändert sich eine dieser Einflussgrößen, so muss sichergestellt werden, dass die Auswirkungen entsprechend verarbeitet werden.

Der Einfluss eines Eingangsparameters, wie z.B. die Anzahl von Schweißpunkten an einem Bauteil, muss mit nachgelagerten Schritten abgeglichen werden. Ein Beispiel hierfür ist das Aufrufen einer neuen Berechnung der Prozesszeit bei relevanten Änderungen am Produktmodell.

Eine Kombination der Daten aus der Produkt-, Prozess- oder Ressourcenstruktur definiert die jeweilige Gesamtstruktur. Als Beispiel hierfür kann die Summe der

Einzelzeiten angeführt werden, welche bei einer sequentiellen Folge die Gesamtdurchlaufzeit bestimmt. Ein weiteres Beispiel ist die Anzahl der Ressourcen mit ihren jeweiligen Anschaffungskosten, welche die Höhe der Gesamtinvestition festlegen. Die Aggregation innerhalb eines Produktmodells hängt, wie Abbildung 52 verdeutlicht, von verschiedenen Randbedingungen ab. So ergibt sich die Gesamtmasse aus der Summe der Massen der untersten Elemente. Anders verhält es sich z.B. bei den Kosten des Gesamtproduktes, da hierbei auch durch das Fügen der beiden Einzelgehäuse zu einem Gesamtgehäuse zusätzliche Kosten anfallen. Bei den aktuellen Systemen der Digitalen Fabrik stellt dies ein Problem dar, das durch eine manuelle Neuberechnung aggregierter Daten umgangen anstatt gelöst wurde.

Da sich die Gesamtzeiten von Arbeitsfolgen sowohl durch die Anpassungen einer speziellen Einzelzeit als auch durch das Hinzufügen oder Entfernen von Elementen verändern, werden diese Berechnungen immer manuell neu gestartet. Um sicherzustellen, dass dieser manuelle, prozedurale Berechnungsschritt auch neu ausgeführt wird, werden aggregierte Werte bei jedem Speichern und Neuaufrufen gelöscht.

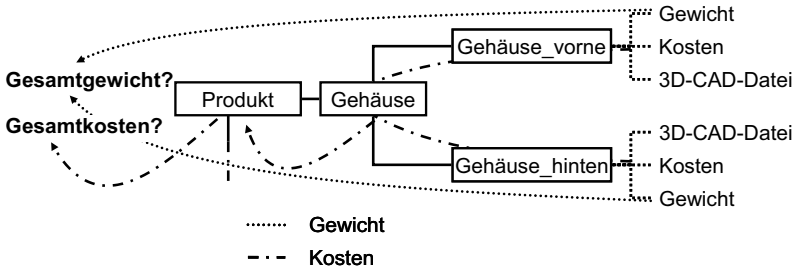


Abbildung 52: Aggregation innerhalb eines Produktmodells (nach BENDER 2005)

Dieser manuelle und zeitaufwändige Vorgang kann ebenfalls durch Methoden, die wissensbasierte Systeme zur Verfügung stellen, automatisiert werden. Hierfür existiert eine Reihe von selbstaufzufindenden Elementen, die im weiteren Verlauf näher erläutert werden. Änderungen von Daten innerhalb der Struktur haben durch implizite Querbezüge Auswirkungen auf das Gesamtprodukt. Beispiele hierfür sind Aktualisierungen des Datums für die Durchlaufzeit beim Ändern, Hinzufügen oder Löschen eines Prozessschrittes. Zur Klärung dieser Fragestellung kommt entweder eine redundante Speicherung oder die Verwendung eines

speziellen Algorithmus in Betracht. Nach allgemeinen methodischen Ansätzen werden im folgenden Abschnitt Softwarewerkzeuge ausgewählt, mit denen eine wissensbasierte Montageplanung ermöglicht wird.

5.4 Werkzeugauswahl

Vorhandene Systeme der Digitalen Fabrik unterstützen nicht die für eine wissensbasierte Planung notwendigen Methoden wie Regeln oder Constraints. Aus diesem Grund ist es erforderlich, zunächst Werkzeuge auszuwählen, die das im vorigen Abschnitt als erforderlich abgeleitete Beziehungswissen abbilden können. Im zweiten Schritt gilt es, ein Integrationskonzept dieser Werkzeuge für die Einbindung in die Systemwelt der Digitalen Fabrik zu definieren. BLEY et al. (2006) sprechen in diesem Zusammenhang auch von der wechselseitigen Beeinflussung von Methode und Werkzeug. Da ab dem Zeitpunkt der Werkzeugauswahl ein spezifisches Feinkonzept erarbeitet werden muss, wird dies in Kapitel 6 näher erläutert.

Prinzipiell kann jede Programmiersprache für die Entwicklung wissensbasierter Systeme verwendet werden. Allgemeine Programmiersprachen sind zwar sehr flexibel, aber ihr Leistungsumfang und Spezialisierungsgrad im Hinblick auf die Entwicklung wissensbasierter Systeme sind als gering einzustufen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung so genannter Shells (VDI-EKV 1992). Diese sind meist aus der Verallgemeinerung wissensbasierter Systeme entstanden. Sie stellen einen vordefinierten Satz von Mechanismen zur Wissensrepräsentation und Verarbeitung bereit und können somit nur in begrenztem Maße erweitert werden. Als dritte Möglichkeit kommen universelle Entwicklungsumgebungen in Betracht, die Softwarekomponenten für wiederkehrende Aufgabenstellungen, wie Wissensrepräsentation und Verarbeitung, beinhalten. Die einzelnen Bausteine werden vom Entwickler in Abhängigkeit der jeweiligen Aufgabenstellung miteinander kombiniert. Auf diese Weise bieten sie einen großen Leistungsumfang bei geringem Spezialisierungsgrad, der sich allerdings auch in einer hohen Komplexität niederschlägt. Daher eignen sie sich insbesondere für die Entwicklung großer, komplexer Anwendungssysteme. Sie bieten oftmals auch die Möglichkeit zur objektorientierten Programmierung. Für die Wissensverarbeitung werden vielfach Regeln und weitere Techniken, wie z.B. Trigger, angeboten. Entscheidend ist hierbei die Möglichkeit der Anbindung von Datenbanken. Diese Entwicklungssysteme stellen nicht nur hohe Anforderungen an die Rechenleis-

tung und die Speicherkapazität, sondern sie erfordern vom Entwickler einen großen zusätzlichen Einarbeitungsaufwand. Ein wesentlicher Grund hierfür ist die Vielzahl von bereitgestellten Hilfsmitteln, die jeweils für unterschiedliche Aufgabenstellungen geeignet sind. Es gilt, diese so miteinander zu kombinieren und zu erweitern, dass eine optimale Wissensrepräsentation ermöglicht wird.

Ein alternativer Weg besteht in der Erweiterung von bestehenden PLM-Systemen, die bereits viele der notwendigen Basismethoden, wie z.B. die Abbildung von Beziehungswissen, über Regeln und Constraints bereitstellen. Die Relevanz dieses Ansatzes wird letztlich auch in kommerziellen Entwicklungen zur Einbeziehung der Prozessplanung belegt. In diesem Zusammenhang hat SAP seit 1997 das Konzept des integrierten Produkt- und Prozess-Engineering (iPPE) entwickelt, das z.B. im Rahmen des Projektes PEP PLM bei BMW umgesetzt wurde (KOHLEHOFF 2005). Das Ziel liegt darin, jederzeit transparente und verbindliche Informationen über den Stand der Produkt- und Prozessentwicklung bereitzustellen. Es unterstützt allerdings keine wissensbasierte Montageplanung, welche die Abbildung detaillierten produktionstechnischen Wissens, wie z.B. die Ermittlung von Vorgabezeiten einzelner Prozessschritte, beinhaltet. Ein entscheidender Nachteil von Systemen wie SAP iPPE besteht in der für den Nichtfachmann geringen Erweiterungsfähigkeit. Aus diesem Grund wird im Folgenden die Nutzung von universellen Entwicklungsumgebungen weiterverfolgt, die speziell in der Arbeitsplanung eingesetzt werden können. Neben allgemeinen Bewertungsmaßstäben für Softwareentwicklungsumgebungen gelten einige zusätzliche Kriterien für diese Systeme:

- Wie variabel und allgemeingültig lassen sich Erfahrungen eines Praktikers in einem Rechnermodell formulieren und verwenden?
- Ist ein Zugriff auf die der Entwicklungsumgebung zu Grunde liegende Programmiersprache möglich? Lässt sich somit die Software in ihrer Funktionalität erweitern?
- Werden Systementwicklung und -anwendung durch eine leistungsfähige Benutzeroberfläche und grafische Elemente unterstützt?
- Welche Möglichkeiten existieren, konventionelle Programme oder Datenbanken mit dem wissensbasierten System zu verbinden?
- Erlaubt das Werkzeug die Entwicklung modularer Systeme mit einem flexiblen Zugriff auf Objekte, Regeln und Elemente der Benutzeroberfläche?
- Welchen Verbreitungsgrad hat die Lösung im industriellen Umfeld?

Neben diesen sechs speziellen Kriterien für universelle Entwicklungsumgebungen sind bei der Auswahl geeigneter Softwarewerkzeuge auch die in Kapitel 4 angeführten vier Anforderungen an eine wissensbasierte Montageplanung zu berücksichtigen. Hieraus lässt sich eine Bewertungsmatrix mit zehn Kriterien aufstellen, die in Tabelle 2 gezeigt wird. Diese Matrix wird in Abschnitt 6.2 für die Auswahl der für die weitere Feinkonzeption geeigneten Entwicklungsumgebung verwendet.

	System 1	System 2	Sy
Objektorientierung			
Verschiedene Grundformen der Wissensrepräsentation			
Strukturbeziehungen			
Zeitliche Abhängigkeiten von Prozessen			
Komplexes Beziehungswissen zwischen Klassen			
Intuitivität der Wissensabbildung			
Erweiterbarkeit			
Leistungsfähige Benutzeroberfläche und grafische Elemente			
Zugriff auf Datenbanken und andere Systeme			
Flexibler Zugriff auf Objekte, Regeln und Elemente der Benutzeroberfläche			
Hoher Verbreitungsgrad in der Industrie			

Tabelle 2: Kriterien zur Auswahl einer universellen Entwicklungsumgebung

Neben dem Werkzeugkonzept ist es notwendig, mögliche Formen der Integration zu betrachten, da Systeme der Digitalen Fabrik, wie sie in Abschnitt 3.3.3 vorgestellt wurden, um wissensbasierte Funktionen erweitert werden sollen.

5.5 Allgemeines Integrationskonzept

Es gilt, mit wissensbasierten Methoden und Systemen die Defizite der Digitalen Fabrik, die sich bisher auf die Planung mit Hilfe von vorhandenen Planungsergebnissen und Bibliothekselementen beschränkt, zu beseitigen. Die Untersuchungen in Abschnitt 5.3 haben gezeigt, dass die Hauptaufgaben in der Abbildung komplexer Beziehungen sowie der Realisierung einer umfassenden Konsistenz liegen. Aktuelle Werkzeuge der Digitalen Fabrik beruhen jedoch auf einer einfachen, prozeduralen Programmlogik. Wie von KLAUKE (2002) dargestellt, werden bisher nur Skripte unterstützt, die entweder manuell ausgelöst oder mit der Ausführung bestimmter Aktionen, wie z.B. dem Löschen von Elementen, verbunden werden. Wissensbasierte Systeme können solche Abhängigkeiten konsistent z.B. durch Regeln oder Constraints abbilden. Es gilt daher, ein Prozessplanungswerkzeug der Digitalen Fabrik mit einem wissensbasierten System zu verknüpfen. Hierfür kommen unterschiedliche Konzepte in Anlehnung an Arbeiten aus dem Bereich der Integration von CAD-Systemen mit wissensbasierten Systemen (VDI-EKV 1992) und modernen EAI-Anwendungen (DANGELMEIER et al. 2002) in Betracht. Diese lassen sich in drei verschiedene Arten der Integration unterteilen:

Dateiorientierte Integration

Die erste Stufe der Integration beinhaltet die Datenüberführung. Sie ist darauf ausgerichtet, Daten aus dem System der Digitalen Fabrik so aufzubereiten, dass sie von einem wissensbasierten System verarbeitet werden können. Die Überführung ist einseitig ausgerichtet und beinhaltet die formale Prüfung einzelner Datenfelder sowie deren Zuordnung. Diese Art der Integration ist am einfachsten zu realisieren. Sie ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn hierbei keine kritischen Informationen verloren gehen.

Prozessorientierte Integration

Hierbei laufen die beiden Systeme in unabhängigen Prozessen, wobei zwischen ihnen an geeigneten Schnittstellen Kommunikationsmöglichkeiten genutzt werden. Diese Verbindung besteht zum Beispiel darin, dass zur Ermittlung bestimmter Daten das parallel laufende Programm aktiviert wird bzw. dass Prozeduren des einen Programms von einem anderen Programm aufgerufen werden. Das Ziel hierbei ist eine synchrone Kommunikation, bei der das aufrufende System wartet, bis das andere die Anforderungen abgearbeitet hat. Problematisch bei dieser Art der Verbindung ist jedoch, dass zwar im Programmablauf eine enge Integration

erzielt wird, jedoch das Problem der Datenumwandlung weiterhin besteht. Es wird sogar noch dadurch verschärft, dass die Umwandlung während der Wartezeit des Benutzers erfolgen muss. Weiterhin ist für diese Art der Verbindung von Systemen eine sehr individuelle Programmierung notwendig.

Programmintegration

Eine weitere Stufe der Integration bildet die programmorientierte, geschlossene Abwicklung der beiden vorher getrennten Systemvorgänge in einem Programm. Voraussetzung hierfür ist ein gemeinsamer Adressbereich, eine einheitliche Darstellung sowie eine durchgängige Benutzeroberfläche. Sie stellt den höchsten Grad der Integration dar und erfordert umfangreiche Programmänderungen im Quellcode.

5.6 Fazit

In diesem Kapitel wurde ein allgemeines Gesamtkonzept für die Realisierung einer wissensbasierten Montageplanung entwickelt. Dieses besteht aus einem werkzeuginspezifischen Grobkonzept und einem werkzeugspezifischen Feinkonzept. In diesem Kapitel wurde das Grobkonzept vorgestellt, das die folgenden Schritte beinhaltet:

- Untersuchung kommerzieller Systeme der Digitalen Fabrik
- Nutzung erzeugender Verfahren
- Erarbeitung eines Werkzeug- und eines Integrationskonzeptes

Bei der Untersuchung der bestehenden kommerziellen Systeme der Digitalen Fabrik wurde bewusst nur ein Werkzeug im Detail betrachtet, da die Funktionalitäten und der Aufbau derartiger Systeme nach WALTER (2002) untereinander vergleichbar sind. In der vorliegenden Arbeit wurde der eM-Planner[®] von UGS aufgrund des leichten Zugriffs am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München ausgewählt. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass für die Abbildung von Varianten in den bestehenden, kommerziellen Systemen ein Filter genutzt wird, der methodisch einer Plus-Minus-Stückliste entspricht (siehe Abschnitt 2.4.3.2).

Derartige Stücklisten eignen sich nur für ein eingeschränktes Variantenspektrum. Im Gegensatz dazu werden für hochvariantenreiche Produkte Varianten-

stücklisten verwendet, die auf wissensbasierten Methoden beruhen. Daher wurde in diesem Kapitel auch untersucht, ob und in welcher Weise diese für die Montageplanung verwendet werden können. Eine zentrale Anforderung aus Abschnitt 4.3 ist die Umsetzbarkeit des Konzeptes mit bestehenden Softwaretools. Hierfür wurden in Abschnitt 5.4 Anforderungen an ein Werkzeugkonzept erarbeitet und verschiedene grundsätzliche Lösungsansätze aufgezeigt.

Das in Kapitel 5 entwickelte Grobkonzept wird nun in Kapitel 6 genutzt, um ein Umsetzungswerkzeug auszuwählen, anhand dessen das werkzeugabhängige Feinkonzept aufgestellt wird. Dieses Feinkonzept wird in Abschnitt 6.5 in dem in dieser Arbeit entwickelten Softwaresystem GenPlanner (Generischer Planer) umgesetzt, um auf dieser Basis die Potenziale wissensbasierter Systeme für die Montageplanung in der Digitalen Fabrik zu demonstrieren.

6 Feinkonzept und dessen Umsetzung

6.1 Allgemeines

In diesem Kapitel wird das in Kapitel 5 entwickelte Grobkonzept für die Auswahl eines geeigneten Werkzeuges und die Entwicklung eines werkzeugspezifischen Feinkonzeptes herangezogen. Hierbei werden die allgemeinen Erkenntnisse aus Kapitel 5 genutzt, um ein spezifisches Werkzeug auszuwählen und für dieses unter den Randbedingungen der vorliegenden Arbeit ein Integrationskonzept zu definieren. Ein weiterer wichtiger Aspekt in diesem Kapitel ist die Wissensverarbeitung, die stark werkzeugspezifisch erfolgen muss und daher erst im Rahmen des Feinkonzeptes untersucht wird. Auf der Basis der drei Bereiche *Werkzeugkonzept*, *Integrationskonzept* und *Wissensverarbeitung* wird das selbstentwickelte System GenPlanner vorgestellt und dessen Nutzenpotenzial anhand eines Fallbeispiels aus der Automobilindustrie aufgezeigt.

Das vorliegende Kapitel ist in sieben Abschnitte unterteilt: Nach diesem einleitenden Abschnitt werden in Abschnitt 6.2 zunächst verschiedene universelle Entwicklungsumgebungen mit Hilfe der in Abschnitt 5.4 erstellten Auswahlmatrix verglichen und ein Werkzeug für das weitere Vorgehen bestimmt. Mit Hilfe dieses Werkzeugs wird in Abschnitt 6.3 ein Integrationskonzept auf der Basis der Erkenntnisse aus Abschnitt 5.5 erarbeitet und umgesetzt. Weiterhin wird in Abschnitt 6.4 dargestellt, wie die übertragenen Daten im Zielsystem mit wissensbasierten Methoden verarbeitet werden können. Die gewonnenen Erkenntnisse werden in Abschnitt 6.5 für die Realisierung des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Systems GenPlanner genutzt. In Abschnitt 6.6 wird anhand eines einfachen Beispiels aus dem Automobilbereich für drei Planungsfälle aufgezeigt, welche Vorteile sich durch ein wissensbasiertes Montageplanungssystem im Unterschied zu einem konventionellen erzielen lassen. Der hierdurch realisierbare Nutzen wird qualitativ in Abschnitt 6.7 bewertet.

6.2 Auswahl des Werkzeuges

In Abschnitt 5.4 wurde als Grobrichtlinie für die Umsetzung der wissensbasierten Montageplanung die Nutzung von universellen Entwicklungsumgebungen empfohlen, für deren Auswahl eine Matrix entwickelt wurde. In diesem Abschnitt

werden nun mögliche Systeme vorgestellt, von denen eines für die Entwicklung des weiteren Feinkonzeptes genutzt wird.

GÜNTER et al. (1999) geben einen Überblick über die am Markt für diese Aufgabenstellung verfügbaren Systeme. Speziell für den beschriebenen Anwendungsfall der wissensbasierten Montageplanung kommen drei Systeme in die engere Wahl, die kurz vorgestellt und anhand der aufgabenspezifischen Anforderungen aus Abschnitt 5.1 miteinander verglichen werden.

Das System CAMELEON EPOS[®] (vormals ET-EPOS[®]) der Firma Access Commerce GmbH beruht auf dem Prinzip der Entscheidungsbäume, die in einer speziellen Art von Tabellen realisiert werden (GÜNTER et al. 1999). In den Tabellen werden die Abhängigkeiten der Konfiguration eingetragen und in einer vorgegebenen Reihenfolge abgearbeitet. In vielen planerischen Bereichen ist die Anwendung von Tabellenkalkulationsprogrammen, z.B. von Microsoft Excel[®], weit verbreitet. Daher ist das Grundprinzip von CAMELEON EPOS[®] in den meisten Fällen leicht verständlich und ermöglicht auch die Wissensakquisition durch den Nichtfachmann. Bei komplexen Anwendungen, in denen die Abläufe nicht fest vorgegeben werden können, sondern komplexe Relationen notwendig sind, zeigt das System allerdings Schwächen. Da es die meisten einfachen Anforderungen abdecken kann, wurde dennoch eine hohe Marktpräsenz erreicht.

Das System camos.Develop[®] (als Nachfolger des Systems SECON[®]) wird von der Firma camos Software und Beratung GmbH angeboten. Die Komponenten der zu konfigurierenden Objekte werden in diesem System in einem Klassenbaum dargestellt. Es besteht die Möglichkeit, sowohl Aggregations- als auch Spezialisierungsbeziehungen abzubilden. Die Eigenschaften übergeordneter Klassen werden während des Konfigurierungslaufs mit Hilfe von Vererbungsmechanismen an die abgeleiteten Klassen übertragen. Die Pflege des Systems ist hier über eine separate Komponente möglich und kann vom Anwender selbst vorgenommen werden. Während der Konfigurierung kann der Benutzer jederzeit erkennen, ob Inkonsistenzen in Form von Konflikten auftreten. Diese müssen manuell durch die Auswahl anderer, geeigneter Komponenten behoben werden. Das System verfügt über mehrere Arten von Regeln. Zum einen lassen sich Konstrukte mittels der vorgegebenen Bausteine KANN, MUSS, DARF NICHT und ZUWEISEN erstellen, zum anderen besteht die Möglichkeit, funktionale Zusammenhänge in Form von Prozeduren oder Triggern zu formulieren. In Triggern wird der Prozedurcode hinterlegt. Dieser wird bei ERLAUBT-Triggern unter einer bestimmten Bedingung abgearbeitet oder im Fall von VERBOTEN-

Triggern entsprechend nicht ausgeführt. Trigger werden im Rahmen der Regelarbeitung geprüft und durch Wertänderungen einzelner Elemente gestartet. Die beschriebenen Elemente können grafisch erstellt werden, wobei die Formulierung der Prozeduren vom System unterstützt wird. Constraints werden in camos.Develop[®] bidirektional ausgewertet, sind aber nur passiv, d.h. sie beeinflussen die Steuerung des Konfigurierungsverlaufs nicht, sondern schränken lediglich den Lösungsraum ein. Der Konfigurierungsvorgang erfolgt manuell, wird allerdings durch die fortlaufende Konsistenzüberprüfung anhand der Constraints unterstützt.

Auch das System ENGCON[®] der encoway GmbH verwendet IST-EIN- und HAT-TEIL-Beziehungen. Im Unterschied zu camos.Develop[®] bietet es allerdings die Möglichkeit, die Konfiguration über Constraints aktiv zu steuern. Hierzu wird ein Constraint-Solver eingesetzt, der durch die Einbindung eines Fremdsystems realisiert wurde (RUNTE 2006). Der Anwendungsbereich dieses Systems liegt in erster Linie in einer strukturbasierten Konfiguration mit dem Schwerpunkt auf objektorientierten Mechanismen, die um ein umfassendes Constraint-System erweitert wurden.

```
(def-do
  :name PC
  :oberkonzept domaaenenobjekt
  :parameter ((Preis [0.0 inf])
              (Icon "pc" (non-config true)))
  :relationen ((hat-komponente {{{(ein PC_Komponente) 7 16]} :=
    [(ein Gehäuse) 1 1]
    [(ein Mainboard) 1 1]
    [(ein Prozessor) 1 1]
    [(ein Speicher) 1 3]
    [(ein Netzwerkkarte) 0 2]
    [(ein VGA_Karte) 1 2]
    [(ein TV_Karte) 0 1]
    [(ein Soundkarte) 0 1]
    [(ein Festplatte) 1 2]
    [(ein CD_Rom) 1 2]])
              (hat-peripherie {{{(ein Peripherie_Komponente) 3 8]} :=
    [(ein Monitor) 1 2]
    [(ein Maus) 1 1]
    [(ein Tastatur) 1 1]
    [(ein Drucker) 0 1]
    [(ein Scanner) 0 1]
    [(ein Joystick) 0 1]
    [(ein Boxen_Set) 0 1]]))
  :dokumentation "Ein Standard-PC")
```

Abbildung 53: Wurzelkonzept für eine PC-Konfiguration am Beispiel von ENGCON[®] (nach RUNTE 2006)

Das System ENGCON[®] bietet eine Vielzahl an Möglichkeiten zur Wissensrepräsentation, die Modellierung erfordert allerdings umfangreiche Programmierkenntnisse (siehe Abbildung 53). Für die Entwicklung der weiteren Feinkonzeptes ist es erforderlich, die Auswahl eines Entwicklungssystems zu treffen, um sicherzustellen, dass das entwickelte Konzept auch mit bereits am Markt verfügbaren Systemen umgesetzt werden kann. Hierzu wird die in Abschnitt 5.5 aufgestellte Auswahlmatrix auf die drei Systeme CAMELON EPOS[®], camos.Develop[®] und ENGCON[®] in Tabelle 3 angewendet. Es zeigt sich in der Gegenüberstellung, dass CAMELON EPOS[®] zwar eine einfache Modellierung mit Hilfe von Entscheidungstabellen ermöglicht, diese aber nicht ausreicht, um insbesondere Strukturbeziehungen, zeitliche Abhängigkeiten oder auch komplexe Wissensbeziehungen abzubilden. Das System ENGCON[®] bietet zwar die dazu notwendige Flexibilität, erreicht dies aber durch eine komplizierte programmernahe Modellierung. Die bisher noch geringe Marktdurchdringung dieses Systems rührt unter anderem aus der noch jungen Firmengeschichte des Unternehmens her (ENCOWAY 2005).

Wie Tabelle 3 zeigt, verfügt das System camos.Develop[®] über die leistungsfähigste Benutzeroberfläche, einen umfassenden Zugriff auf verschiedene Datenbanktypen und vielfältige Objekt- und Regelkonstrukte. Diese Funktionalitäten in Verbindung mit einer guten Leistungsfähigkeit zur Wissensverarbeitung bei gleichzeitig beherrschbarer Intuitivität der Wissensabbildung sind die wesentlichen Gründe für die Auswahl dieses Systems zur weiteren Entwicklung der Methode.

	CAMELEON EPOS	camos.Develop	ENGCON
Objektorientierung	⊕	●	●
Verschiedene Grundformen der Wissensrepräsentation	⊕	●	●
Strukturbeziehungen	⊕	●	●
Zeitliche Abhängigkeiten von Prozessen	⊕	⊕	⊕
Komplexes Beziehungswissen zwischen Klassen	⊕	●	●
Intuitivität der Wissensabbildung	●	⊕	⊕
Erweiterbarkeit	⊕	●	●
Leistungsfähige Benutzeroberfläche und grafische Elemente	⊕	●	⊕
Zugriff auf Datenbanken und andere Systeme	⊕	●	⊕
Flexibler Zugriff auf Objekte, Regeln und Elemente der Benutzeroberfläche	⊕	●	⊕
Hoher Verbreitungsgrad in der Industrie	●	●	⊕

- Anforderung voll erfüllt
- ⊕ Anforderung teilweise erfüllt
- ⊕ Anforderung kaum/nicht erfüllt

Tabelle 3: Gegenüberstellung wissensbasierter Entwicklungssysteme

6.3 Integrationskonzept

6.3.1 Auswahl des Konzeptes

Aufgrund des nicht offenen Zugangs zum Kern der Softwaresysteme eM-Planner[®] und camos.Develop[®] ist eine Programmintegration, wie sie in Abschnitt 5.5 vorgestellt wurde, im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Diese Form der Integration greift in die innerste Struktur und die Abbildung der dort hinterlegten Daten ein und kann daher nur von den Softwareanbietern selbst realisiert werden. Da sie erhebliche Vorteile für eine umfassende wissensbasierte Planung mit allen bestehenden Funktionen der Digitalen Fabrik, wie z.B. die Anbindung an Simu-

lationssysteme, bietet, sollte sie allerdings aufbauend auf den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit weiter verfolgt werden (siehe Kapitel 7).

Eine prozessorientierte Integration ist ebenfalls nicht anzustreben, da die notwendige Funktionalität über das Aufrufen einzelner Programmbausteine, wie z.B. die Berechnung komplexer Funktionen in einem externen Werkzeug, weit hinausgeht. Die Methoden wissensbasierter Systeme stellen vielmehr einen zentralen Kern der notwendigen Funktionalität dar.

Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit die dateiorientierte Integration weiter verfolgt, bei der in einem einmaligen Vorgang das gesamte im Prozessplanungswerkzeug hinterlegte Wissen mit Hilfe einer Datei in ein wissensbasiertes Zielsystem überführt werden kann. Für die Realisierung der Portierbarkeit zwischen einem System der Digitalen Fabrik und einem wissensbasierten System soll möglichst auf Standards und bestehende Export- und Importfunktionen der Systeme zurückgegriffen werden. Hierfür sind geeignete Formen der Datenmodellierung und des -austausches zu wählen. CONSTANTINESCU et al. (2006) geben, wie in Tabelle 4 dargestellt, einen Überblick über verschiedene Initiativen und Standards in der Prozess- und Fabrikplanung.

Eine ausführliche Erläuterung der Standards sowie der bei ihrer Definition beteiligten Konsortien kann im Rahmen dieser Arbeit nicht vorgenommen werden, für eine genauere Betrachtung sei deshalb auf CONSTANTINESCU et al. (2006) verwiesen.

Funktion/ Rolle	Konsortium, Initiative oder IT-Anbieter	Standard
Datenbeschreibung und -modellierung	ISO	STEP
	OMG	UML
	W3C	XML, WebServices, WSDL
Datenaustausch	ISO	STEP
	OMG	XMI
	W3C	XML, SOAP
	VDA	ENGDAT, VDAFS
Plattform	Microsoft	.NET
	Sun Microsystems	J2EE, J2SE, J2ME
	OASIS	UDDI

Tabelle 4: *Übersicht der Initiativen und Standards in der Fabrikplanung (nach CONSTANTINESCU et al. 2006)*

Für die Modellierung und den Austausch gilt es, ein möglichst einheitliches Format auszuwählen. Aufgrund dieser Anforderung kommen sowohl STEP als auch XML in die engere Wahl. Gegen die Verwendung von STEP spricht jedoch eine nicht umfassende Abbildung von prozess- und ressourcenorientierten Daten (FELTES & LÄMMER 2005, ZÄH & RUDOLF 2005, MACKE 2006). Dieser Schwachpunkt und die weite Verbreitung von XML-Funktionen sowohl in Werkzeugen der Digitalen Fabrik als auch in wissensbasierten Systemen sind der Grund für deren weitere Nutzung.

Darüber hinaus wird XML in der Fachliteratur als viel versprechender Ansatz für einen strukturierten Datenaustausch in der Digitalen Fabrik gesehen (FELTES & LÄMMER 2005, VDI-RICHTLINIE 4499 2006). Ein weiterer Grund, der für dieses Vorgehen spricht, ist die Nutzung von XML in PLM-Systemen, die der Digitalen Fabrik vorgelagert sind (NÖTZKE 2002, KRAUSE et al. 2003). Um z.B. ein PLM-System erstmalig in Betrieb zu nehmen, ist es oftmals erforderlich, existierende Daten aus anderen Verwaltungssystemen oder auch früheren PLM-Systemen mit einer Vielzahl von Stammdaten und Beziehungen zu übernehmen. Hierfür wird analog zur gegebenen Aufgabenstellung ein Werkzeug benötigt, das Daten zwischen einem extern vorgegebenen Schema und einem Zielmodell konvertiert. Datenbanken bieten für vergleichbare Aufgaben so genannte Loaderfunktionen an. PLM-Systeme verwalten jedoch ähnlich wie die Systeme der Digitalen Fabrik ihre logische Struktur zusätzlich in einem Speicher, dem so genannten Repository, das hierarchisch über einer Datenbank liegt und von dieser nicht vollständig auswertbar ist. Aufgrund dieser Tatsache wird von der Nutzung einer datenbankbasierten Loader-Funktion abgeraten (EIGNER & STELZER 2001). Als Konsequenz hat sich bei PLM-Systemen ein Konzept auf der Basis des XML-Schemas durchgesetzt, bei dem davon ausgegangen wird, dass sowohl das Alt- als auch das Zielsystem mit XML arbeiten. Zunächst werden die internen Informationen des abzulösenden PLM-Systems in ein systemspezifisches XML-Schema geschrieben. Andere Applikationen, die ebenfalls mit XML arbeiten, können grundsätzlich diese Daten importieren. Als noch offene Aufgabenstellung müssen somit nur noch die beiden Schemata ineinander überführt werden. Für diese Zuordnungsaufgabe, die auch als *mappen* bezeichnet wird, existieren umfangreiche, kommerzielle Werkzeuge. Diese Methode wird für die Portierung von Informationen aus der Digitalen Fabrik in ein wissensbasiertes System adaptiert. Für das detaillierte Verständnis der nächsten Abschnitte sind Grundlagen der XML-Notation notwendig, die im Anhang dieser Arbeit erläutert sind.

6.3.2 Vorbereitung der Integration

6.3.2.1 Allgemeines

Kommerzielle Systeme der Digitalen Fabrik sind, wie bereits im Stand der Technik dargestellt, zumindest in Unternehmen des Automobilbaus weit verbreitet. Aus diesem Grund bestand der Anspruch, vorhandenes Planungswissen in den zu entwickelnden Prototypen übernehmen zu können, um so die Akzeptanz dieses neuen Ansatzes sicherzustellen. Dieser Vorgang entspricht der klassischen Phase des Wissenserwerbs, die oftmals mit erheblichem Aufwand verbunden ist (PUPPE 1991, HAMELMANN 1995).

Als kommerzielles Werkzeug zum Durchführen eines Mappings wird für die praktische Umsetzung der Microsoft BizTalk-Server[®] ausgewählt. Dieser gehört nach einer Studie der META GROUP (2004) (die inzwischen von der Gartner Group aufgekauft wurde) zu den führenden Produkten in diesem Bereich und kann dank einer engen Kooperation zwischen dem Unternehmen Microsoft Deutschland GmbH und der Technischen Universität München dort kostenlos für Forschung und Lehre genutzt werden. In den folgenden Abschnitten wird erläutert, wie das Konzept der Datentransformation, das in Abbildung 54 skizziert ist, mit den ausgewählten Softwarewerkzeugen umgesetzt werden kann.

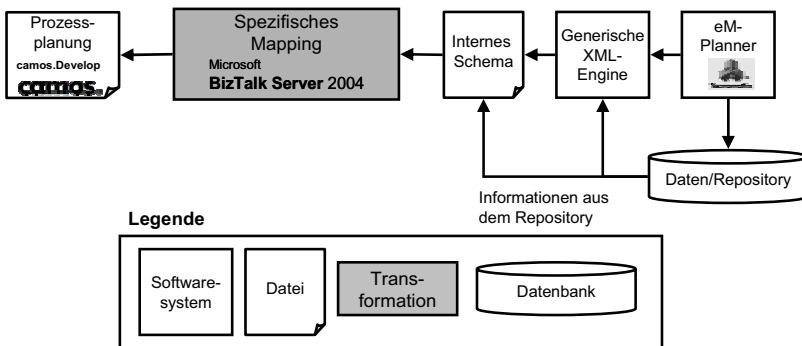


Abbildung 54: Konzept einer Datentransformation vom em-Planner[®] in das wissensbasierte System camos.Develop[®] unter Zuhilfenahme des Microsoft BizTalk Server[®]

Alle grundlegenden Planungsinhalte können in das Zielsystem übernommen werden. Hierzu ist es allerdings erforderlich, die XML-Strukturen der beiden Systeme, eM-Planner® und camos.Develop®, denen eine gänzlich unterschiedliche Planungslogik zugrunde liegt, einander zuzuordnen. Auf dieser Basis können in einem weiteren Schritt die Daten aus dem eM-Planner® in das System camos.Develop® überführt werden. Hierzu werden in den beiden nachfolgenden Abschnitten die Strukturen der XML-Dateien der beiden Systeme analysiert.

6.3.2.2 Analyse der XML-Strukturen des Systems eM-Planner®

Abbildung 55 zeigt einen Auszug eines XML-Dokumentes, das aus dem eM-Planner® exportiert wurde.



Abbildung 55: Projektauszug aus dem System eM-Planner® in Form eines XML-Dokumentes

Auf eine ausführliche Einführung in die Syntax der Auszeichnungssprache XML wird an dieser Stelle verzichtet, es werden lediglich die grundlegenden Zusammenhänge erläutert. Für eine kurze Einführung sei auf den Anhang dieser Arbeit und zur Vertiefung auf entsprechende Fachquellen verwiesen (HAROLD et al. 2005, NOACK 2005, W3C 2006). Alle im eM-Planner[®]-Projekt enthaltenen Elemente sind unter dem Datensatz <Objects> auf einer Hierarchieebene zusammengefasst. Für jedes Element existiert in dieser Struktur ein eigener Datensatz, in dem die spezifischen Eigenschaften des Objekts hinterlegt sind. Er trägt jeweils die Bezeichnung des Elementtyps. Jedem Datensatz ist als Feldattribut die so genannte *ExternalID* als eindeutiges Merkmal zugeordnet, durch die sich jeder Datensatz innerhalb der XML-Struktur eindeutig identifizieren lässt. Die Verknüpfung zwischen den Objekten der Klassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE erfolgt über diese *ExternalID* und wird nun erläutert.

Prozessstruktur

Die Prozessstruktur wird, wie aus Abbildung 55 hervorgeht, durch die Felder <inputFlows> (1), <outputFlows> (2), <parent> (3) sowie <children> (4) in der XML-Datei abgebildet. Mit Hilfe der externen ID-Nummern, die den einzelnen Feldern zugewiesen sind, können die jeweiligen Elemente eindeutig zugeordnet werden. Dies sind sowohl Elemente, die sich in der Prozessstruktur auf einer über- bzw. untergeordneten Ebene befinden, als auch diejenigen Objekte, die auf derselben Hierarchieebene dem betreffenden Element vor- bzw. nachgelagert sind.

Objekte auf einer über- bzw. untergeordneten Ebene werden über <parent> (3) und <children> (4) referenziert. Da jeder Prozess aufgrund der in Abschnitt 3.3.3 dargestellten Struktur lediglich einem hierarchisch höheren Objekt zugeordnet werden kann, ist dessen *ExternalID* direkt in dem Feld <parent> (3) angegeben. Bei den <children> (4), also den jeweils untergeordneten Feldern, können mehrere Elemente enthalten sein. Aus diesem Grund werden die *ExternalIDs* jeweils in einem Feldelement abgebildet, das über den Datensatz <item> dem Datensatz <children> (4) zugeordnet ist. Auch hier entspricht die angegebene *ExternalID* direkt dem jeweiligen Element.

Objekte, die sich auf derselben Ebene befinden, werden über <inputFlows> (1) und <outputFlows> (2) dargestellt. Die Felder vom Typ <item> enthalten hier die *ExternalID* des Verbindungspfeils vom Typ <PmFlow>. Über diesen kann der Vorgänger ermittelt werden, da das gesuchte Element im Feld <outputFlows>

unter <item> ebenfalls die *ExternalID* des <PmFlow> hinterlegt hat. Die Identifikation der jeweiligen Nachfolger gestaltet sich analog. Es wird hierbei lediglich von <outputFlows> (4) ausgegangen und das betreffende Element mit demselben <inputFlows> (3) gesucht. Hierbei ist allerdings zu berücksichtigen, dass auch Bauteile bzw. Baugruppen über die Verbindungspfeile zugewiesen werden. Daraus resultiert eine Unterscheidung der unterschiedlichen Elementtypen, die folgendermaßen realisiert wird:

Besitzt der <PmFlow> unter dem Feld <parts> keinen Eintrag, also kein <item>, gehört die *ExternalID* zu einem Prozess. Steht unter <item> eine *ExternalID*, so handelt es sich bei dem verknüpften Element um ein Bauteil bzw. eine Baugruppe. Auf diese Weise kann die Station 10 als direkter Vorgänger (5) und die Station 30 als direkter Nachfolger (6) ermittelt werden. In den nächsten Abschnitten wird die Verknüpfung von Prozesselementen mit Bauteilen/Baugruppen bzw. Ressourcen erläutert.

Verknüpfung Prozess – Bauteile/Baugruppen

Die in der Produktstruktur abgebildeten und mit dem Prozess verknüpften Bauteile stellen lediglich eine Instanz der in der Bauteilbibliothek hinterlegten Prototypen dar. Diese mehrstufige Verknüpfung ist in Abbildung 56 veranschaulicht.

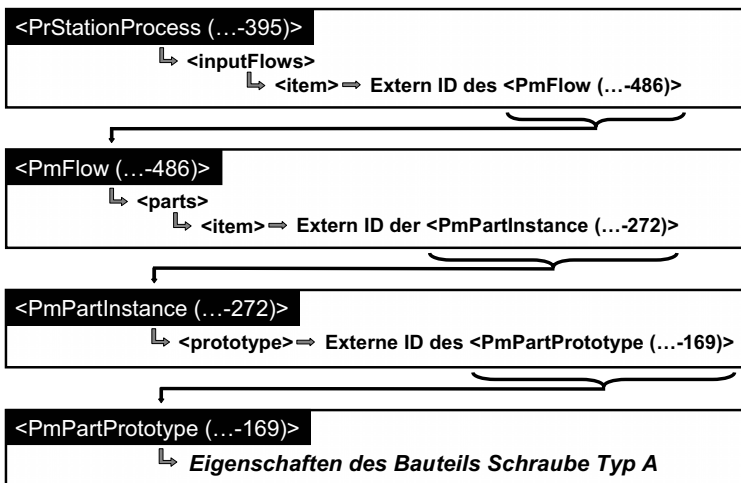


Abbildung 56: Verknüpfung Prozess mit Bauteilen/Baugruppen im eM-Planner®

Die Eigenschaften des Bauteils sind folglich nicht in dem Objekt <PmPartInstance>, sondern in dem Element <PmPartPrototype> der Bibliothek zu finden. Diese Tatsache ist vor dem Hintergrund der durchzuführenden Datentransformation von großer Bedeutung, da einige Bauteileigenschaften, wie beispielsweise die Materialdaten, ebenfalls mit in das Prozessplanungssystem importiert werden sollen.

Verknüpfung Prozess – Ressourcen

Unter dem Feld <usages> ist für jeden Prozess ein eigenes <item> angelegt, in dem die *ExternalID* des Datensatzes <PmUsage> abgebildet ist. Ähnlich wie bei den Bauteilen handelt es sich bei den mit der Prozessstruktur verknüpften Ressourcen lediglich um eine Instanz des in der Bibliothek erzeugten Arbeitsmittels. Um die spezifischen Eigenschaften der Ressource herauszufinden, muss wiederum ein Pfad über verschiedene Datensätze durchlaufen werden, der in Abbildung 57 visualisiert ist.

In diesem Abschnitt wurden die XML-Strukturen und das interne XML-Schema des eM-Planner[®] untersucht, um zu bestimmen, in welcher Form die in Abbildung 54 dargestellte Transformation erfolgen kann. Als nächster Schritt ist zu untersuchen, wie XML-Strukturen gestaltet sein müssen, damit sie so genutzt werden können, dass daraus ein Planungsprojekt im wissensbasierten System GenPlanner erzeugt werden kann.

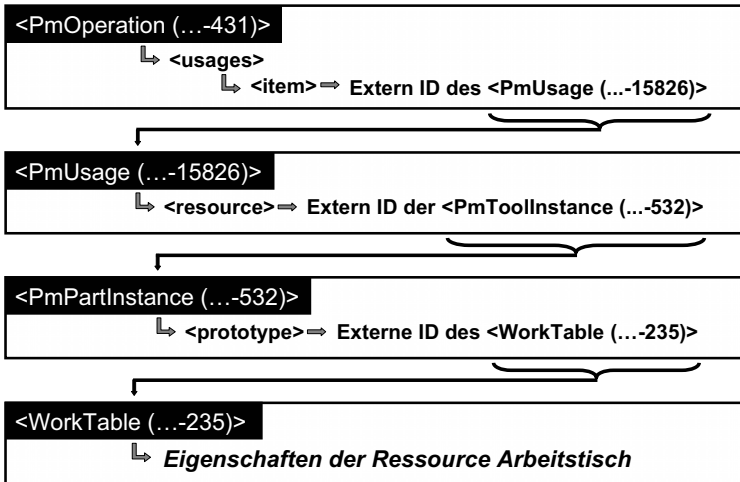


Abbildung 57: Verknüpfung Prozess mit Ressourcen im eM-Planner[®]

6.3.2.3 Analyse der XML-Strukturen des Systems camos.Develop[®]

Bevor die von camos.Develop[®] für einen Import oder Export benötigte XML-Struktur ausführlich analysiert wird, erfolgt eine Beschreibung der beiden wesentlichen Bestandteile der Entwicklungsumgebung: des Klassen- und des Strukturbaums (siehe Abbildung 58). Im Klassenbaum wird eine IST-EIN-Beziehung, die so genannte Taxonomie, wie sie bereits in Abschnitt 2.6.2 erläutert wurde, abgebildet. Die einzelnen Elemente sind so zu gruppieren, dass möglichst viele Klassen unter einer übergeordneten Klasse zusammengefasst werden können. Die untergeordneten bzw. abgeleiteten Klassen besitzen aufgrund des Vererbungsprinzips sämtliche Eigenschaften des jeweils übergeordneten Elements. Sie können jedoch erweitert bzw. modifiziert werden und stellen somit eine Spezialisierung dar.

Innerhalb des Strukturbaums einer Klasse können standardmäßig vier Elemente definiert werden:

- Ergebnisse,
- Trigger,
- Merkmale und
- Komponenten.

Als *Ergebnisse* werden Dokumente bezeichnet, die sich aus unterschiedlichen Textbausteinen zusammensetzen. Der Inhalt dieser Bausteine kann sowohl einen konstanten Teil als auch Daten der Wissensbasis in Form von Einflussgrößen enthalten. Die während des Interpreterlaufs erzeugten Ergebnisse können auf dem Bildschirm oder durch einen angeschlossenen Drucker ausgegeben werden.

Der *Trigger* wird zusammen mit dem ihm zugeordneten Objekt erzeugt und stellt die in ihm enthaltenen Einflussgrößen unter eine ständige Beobachtung. Bei Veränderung einer dieser Größen löst er eine Aktion aus.

Über das Element *Merkmale* ist es möglich, den Klassen bestimmte Eigenschaften zuzuordnen. Hierzu wird in einer Ausprägungsliste eine Zusammenstellung der möglichen Ausprägungen des Merkmals generiert. Sollen einzelne Werte beregelt oder zur Auswahl in einem Konfigurationsprozess angeboten werden, sind sie per Doppelklick aus der Ausprägungsliste in den Strukturbaum zu übernehmen. Zusätzlich kann eine Vorbelegung für das Merkmal definiert werden. Hierbei handelt es sich um ein Element der Ausprägungsliste, das dem Merkmal direkt bei der Instanzierung des Objekts zugewiesen wird.

Mit Hilfe der *Komponenten* wird eine HAT-TEIL-Hierarchie dargestellt. In ihr kann beispielsweise festgelegt werden, aus welchen Bauteilen ein Produkt besteht oder aus welchen Teilschritten sich ein Arbeitsvorgang zusammensetzt (Abbildung 58). Weiterhin ist es möglich, Merkmale und Komponenten in Form von Listen abzubilden, in denen mehrere gleichartige Daten hinterlegt werden können. Die Adressierung der einzelnen Listenelemente erfolgt über einen Index, der in eckigen Klammern hinter der jeweiligen Bezeichnung steht.

Die untersten Elemente in der Klassenbaumhierarchie stellen die Objektklassen dar, aus denen über den Vorgang einer Instanzierung konkrete Objekte erzeugt werden. Die ihnen übergeordneten Basisklassen sind Vaterklassen, die dazu dienen, weitere Objekt- oder Basisklassen abzuleiten, um auf diese Weise auf einer abstrakteren Ebene Merkmale und Komponentenbeziehungen zu definieren.

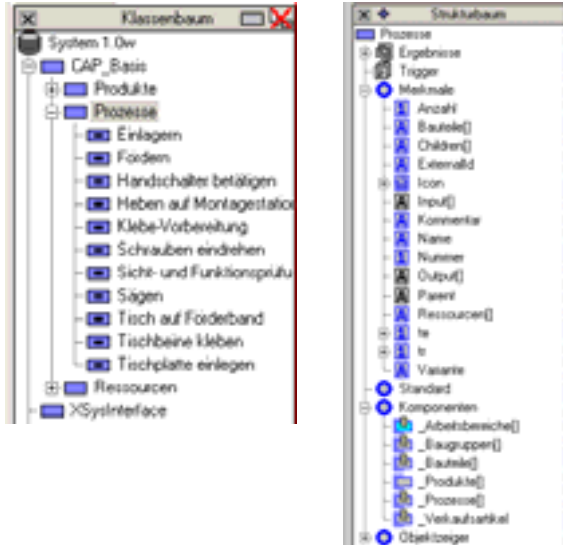


Abbildung 58: Klassen- und Strukturbaum in camos.Develop®

Nach der Beschreibung des Aufbaus von camos.Develop® und dessen Wissensrepräsentationsformen erfolgt nun die Betrachtung der Datenmigration. Entscheidend hierbei ist, welche Elemente in der XML-Struktur mit einem Wert belegt werden müssen, um die unterschiedlichen Merkmale, ihre Ausprägungen sowie die spezifische Vorbelegung zu erzeugen. Abbildung 59 zeigt eine XML-Datei, die aus einer Klasse erzeugt wurde und alle erforderlichen Bestandteile der Struktur beinhaltet.



Datensatz **Feldelement** **Feldattribut**

Abbildung 59: Beispiel einer Klasse als XML-Struktur in camos.Develop[®]

Die einzelnen Elemente werden mit Nummernverweisen auf Abbildung 59 im Folgenden kurz erläutert.

- <GroupNode>: Über das Attribut NAME wird der Typ des Elements im Strukturbaum definiert. => Beispiel: MERKMALE (1)
- <FeNode>: Die Bezeichnung des jeweiligen Merkmals wird als Attribut NAME in der XML-Struktur hinterlegt. => Beispiel: FARBE (2)
- <InitValue><Value> und <InitString>: Für die Erzeugung einer Vorbelegung müssen beide Feldelemente mit der entsprechenden Ausprägung verbunden sein. => Beispiel: BLAU (3)
- <PotValList><PotVal>: Die möglichen Ausprägungen sind jeweils unter einem Datensatz <PotVal> abgebildet. Das Attribut NAME enthält hierbei den Wert der jeweiligen Ausprägung. => Beispiel: BLAU (4)

- <FeAssValueNode>: Ausprägungen, die geregelt werden sollen, zeigt das Attribut NAME dieses Datensatzes an. => Beispiel: BLAU (5)
- <Data><List>: Hier wird der Wert auf 1 gesetzt, falls es sich bei dem Merkmal um ein Listenelement handelt, andernfalls auf 0. => Beispiel: 0 (6)
- <Data><Type>: Dieses Feldelement legt den Datentyp des Merkmals fest. => Beispiel: STRING (7)

Merkmale und ihre Werte können in camos.Develop[®] nur in bereits existierende Klassen importiert werden, weshalb ein zweistufiges Verfahren zur Realisierung der Datenportierung notwendig ist. Hierzu ist es erforderlich, die Klassenstruktur, die in Abbildung 58 auf der linken Seite zu sehen ist, zu erstellen. Diese muss in einem zweiten Schritt mit Inhalten, wie z.B. Merkmalen oder Komponenten, gefüllt werden.

6.3.3 Durchführung der Integration

6.3.3.1 Allgemeines

Auf der Basis der in Abschnitt 6.3.2.2 dargestellten XML-Strukturen der beiden Werkzeuge eM-Planner[®] und camos.Develop[®] wird in diesem Abschnitt erläutert, wie eine Transformation mit der Hilfe des Microsoft BizTalk Server[®] realisiert werden kann. Hierzu werden zunächst die beiden notwendigen Entwicklungsschritte, also Schemaerzeugung und Zuordnung, beschrieben.

6.3.3.2 Erzeugung der erforderlichen Schemata im Editor

Der Biztalk Server-Editor ist ein XML-Bearbeitungswerkzeug für die Definition der semantischen Bedeutung und der Struktur von Dokumenten in einem so genannten XML-Schema. Das für die Abbildung der durch den eM-Planner[®] bereitgestellten XML-Struktur erforderliche Ursprungsschema (eMPlanner.xsd) wird aus dem exportierten XML-Dokument erzeugt und so modifiziert, dass es allgemeingültig genutzt werden kann. Hierbei ist unter anderem sicherzustellen, dass unterschiedliche Reihenfolgen in den XML-Dateien, die bei verschiedenen Exporten systembedingt entstehen können, verarbeitet werden können.

Das Klassenzielschema (CamosStruktur.xsd) ist für die Definition der XML-Struktur erforderlich, aus welcher in camos.Develop[®] der Klassenbaum erzeugt

wird. Der Aufbau dieser Struktur wurde hierbei so gewählt, dass das im Klassenbaum realisierte Prinzip der Vererbung von Merkmalen, Methoden oder Masken Berücksichtigung findet. Das dritte zur Abbildung des Transformationsprozesses erforderliche Schema definiert die benötigte XML-Struktur, um die im Klassenbaum enthaltenen Elemente mit Inhalten belegen zu können. Dieses Schema (CamosKlassen.xsd) kann ebenfalls mit Hilfe des Schemagenerators erstellt werden.

6.3.3.3 Zuordnung der Informationen im Mapper

Im nächsten Schritt ist die Erzeugung der Zuordnung der zwischen den Schemata auszutauschenden Daten zu realisieren. Das hierfür einzusetzende BizTalk Server-Modul ist der so genannte Mapper. Es handelt sich hierbei um ein Zuordnungswerkzeug für die dynamische Transformation des Inhalts und der Struktur von XML-Dokumenten aus einem Quell- in ein gewünschtes Zielformat. Er basiert auf der Programmiersprache XSLT (Extensible Stylesheet Transformation Language), die auf der logischen Baumstruktur von XML-Dokumenten aufbaut und somit die Definition von Umwandlungsregeln für die darin enthaltenen Daten erlaubt (MINTERT 2002).

Für die Realisierung des Integrationskonzepts müssen zwei unterschiedliche Zuordnungen erstellt werden. Im ersten Mapping wird die Transformation der aus dem eM-Planner[®] exportierten Daten in die in camos.Develop[®] zu erstellende Klassenhierarchie vorgenommen. Aufgrund der mehrfach verschachtelten Datenstrukturen (siehe Abschnitte 6.3.2.2 und 6.3.2.3) lässt sich diese Zuordnung nicht grafisch, sondern nur über einen Programmcode realisieren. Der zur Durchführung der Datentransformation erforderliche Code kann hierbei entweder direkt im BizTalk Server-Mapper in einem so genannten Skript hinterlegt werden oder wird mit der Hilfe einer extern definierten XSLT-Datei hinterlegt. Das zweite Mapping, also die Zuordnung der Informationen aus dem im ersten Schritt erstellten XML-Dokument zu der für das Belegen der Elemente im Klassenbaum erforderlichen Struktur, lässt sich vollständig im grafischen Mapper realisieren. Die zu übertragenden Informationen werden hierbei von einem oder mehreren Knoten im Quellschema durch eine grafische Verknüpfung einem oder mehreren Knoten im Zielschema zugeordnet (siehe Abbildung 60).

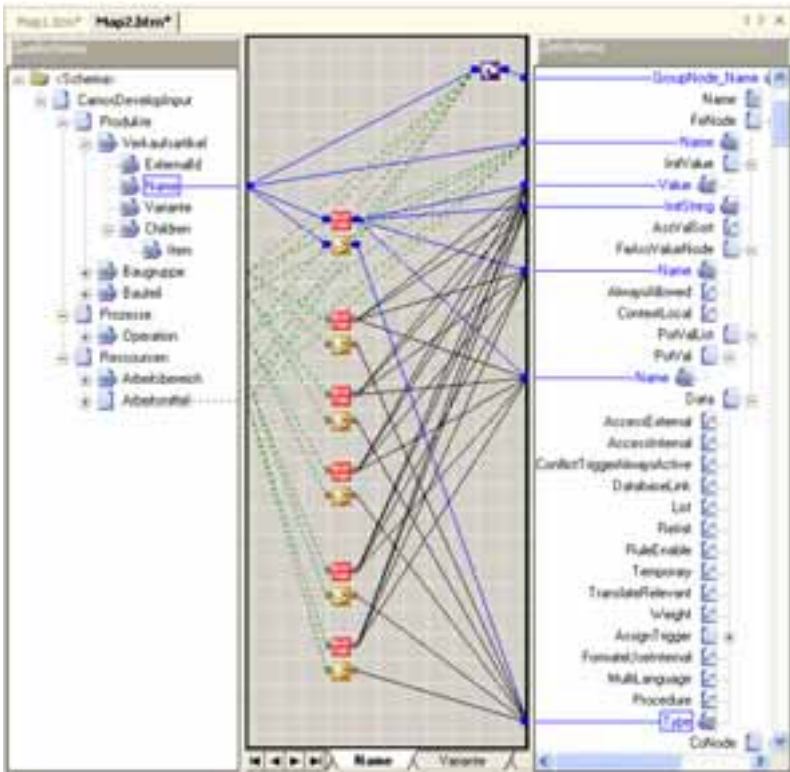


Abbildung 60: Zuordnung der Daten im Microsoft BizTalk Server®-Mapper

Die zu übertragenden Daten müssen entsprechend der für das Zielsystem erforderlichen Syntax aufbereitet werden. Dies ist über so genannte Funktoiden möglich, die zusätzliche Umwandlungs-, Verarbeitungs- und Abstraktionsfunktionen bereitstellen und zwischen den jeweiligen Quell- und Zielknoten grafisch implementiert werden. Im nächsten Abschnitt wird erläutert, wie auf der Basis der beiden XML-Dokumente das Planungswissen in das Zielsystem überführt werden kann. Diese XML-Dokumente beinhalten sämtliche im eM-Planner® erzeugten Varianten, d.h. es wurde kein Filter auf das Projekt angewandt. Auf der Grundlage dieser Daten kann die Implementierung der benötigten Strukturen und Elemente in camos.Develop® durchgeführt werden.

6.4 Wissensverarbeitung

6.4.1 Allgemeines

Neben der Verwendung einer baukastenbasierten Variantenstückliste anstelle einer Plus-Minus-Stückliste (vgl. Abschnitt 5.3) stellt die konsistente Abbildung von Planungswissen ein notwendiges Element in der variantenreichen Montageplanung dar. In Abschnitt 2.6.2 wurden bereits grundlegende Repräsentationsformen in wissensbasierten Systemen vorgestellt. Eine wichtige Anforderung an die Montageplanung ist die Beherrschung einer Vielzahl von Techniken, die es ermöglichen, Wissen auf unterschiedliche Weise zu repräsentieren. Dies ist notwendig, da einzelne Techniken, wie z.B. Entscheidungstabellen, nicht ausreichen, um bestimmte Abhängigkeiten, wie z.B. komplexe Strukturbeziehungen, abzubilden. Neben der Modellierung des Wissens ist entscheidend, dass es in einem wissensbasierten Planungssystem umgesetzt werden kann. In Abschnitt 3.3.3 wurden die beiden kommerziellen Systeme eM-Planner[®] und DELMIA Process Engineer[®] anhand der Arbeiten von JONAS (2000) und KLAUKE (2002) einander gegenübergestellt. Dieser Vergleich hat gezeigt, dass beim eM-Planner[®] kein über die Systemanpassung hinausgehendes Beziehungswissen hinterlegbar ist. Demgegenüber ermöglicht der DELMIA Process Engineer[®] das Erstellen von Skripten, die entweder manuell aufgerufen werden oder sequentiell mit Aktionen des Bedieners, wie z.B. dem Löschen einzelner Elemente, verbunden werden. Bisher wurden lediglich prozedurale Methoden der Wissensrepräsentation in der Montageplanung der Digitalen Fabrik verwendet. Diese manuell oder sequentiell aufgerufenen Methoden sind allerdings nicht dazu geeignet, komplexe Wissensbeziehungen umfassend und konsistent abzubilden. Daher werden an dieser Stelle zentrale Elemente des Systems camos.Develop[®] mit ihren Vor- und Nachteilen sowie möglichen Einsatzbereichen für die Montageplanung vorgestellt:

- Ausgangstrigger
- Zuweisungstrigger
- Trigger
- Regeln
- Prozedurmerkmale
- Entscheidungstabellen
- Constraints

Ausgangstrigger werden prozedural beim Verlassen von bestimmten Maskenfeldern gestartet. Ihr Vorteil besteht darin, dass ihre Ausführung lokal eingrenzbar ist. Nachteilig wirkt sich allerdings aus, dass Programmmethoden mehrmalig durch Maskenelemente und das erstmalige Erzeugen eines Elementes aufgerufen werden. Außerdem müssen Methodenaufrufe bei einer Vorbelegung von Werten aus Fremdsystemen oder einer Datenbank dort manuell hinterlegt werden. Im Unterschied zu den im Folgenden vorgestellten Elementen rufen sie sich nicht selbst auf und sind in ihrer Wirkungsweise mit Skriptenaktionen im DELMIA Process Engineer[®] vergleichbar. Sie werden jedoch nicht an eine bestimmte Aktion des Bedieners, sondern an das Verlassen einzelner Feldelemente gekoppelt.

Der *Zuweisungstrigger* als selbstaufrufendes Element wird immer genau dann ausgeführt, wenn das dem Trigger zugeordnete Merkmal verändert wird. Der Vorteil dieses Elementes besteht darin, dass auch neue Wertzuweisungen, die z.B. von Fremdsystemen ausgeführt werden, den Methodenaufruf auslösen, ohne dass dies zusätzlich hinterlegt werden muss. Nachteilig ist allerdings, dass bei Methoden, die von den Werten mehrerer Merkmale abhängen, der gleiche Zuweisungstrigger an mehreren Stellen hinterlegt werden muss. Dies führt zwangsläufig zu einem größeren Modellierungs- und Pflegeaufwand.

Ein wesentlicher Nachteil von Zuweisungstriggern in Form des jeweiligen Zuordnens zu jedem ihn beeinflussenden Merkmal ist bei *Triggern* insofern beseitigt, als in ihnen zentral ein Prozedurcode hinterlegt werden kann. Jedes im Prozedurcode enthaltene Merkmal wird im Programmablauf von der Inferenzmaschine überwacht, wodurch bei einer entsprechenden Merkmalsänderung der Trigger automatisch gestartet wird. Dies hat den entscheidenden Vorteil, dass keine manuellen Aufrufe notwendig sind und das Wissen zentral abgebildet wird.

Wie bereits erwähnt, sind *Regeln* einfache WENN-DANN-Beziehungen. Hierbei wird eine Aktion ausgeführt, sobald die zugehörige Bedingung erfüllt ist. Im Gegensatz zu einem Zuweisungstrigger wird die Regel nicht dem beeinflussenden Merkmal zugeordnet, sondern an dem Merkmal definiert, das eine bestimmte Aktion erfahren soll. Es gelten jedoch die gleichen Schwächen wie bei einer stark verteilten Wissensabbildung, die schwierig zu pflegen ist.

Die gleiche Einschränkung gilt auch für die so genannten *Prozedurmerkmale*, die ebenfalls dem Zielmerkmal zugeordnet werden. Das Prozedurmerkmal wird dabei mit dem Returnwert der hinterlegten Prozedur belegt. Bei dieser Art der Wis-

sensabbildung ist weiterhin zu beachten, dass Merkmale, die durch Prozedurmerkmale berechnet werden, nicht mehr von außen gesetzt werden können.

Entscheidungstabellen dienen der komfortablen Modellierung und Darstellung von Zuweisungen. Diese werden auf der Basis einer oder mehrerer Bedingungen ausgelöst. Ähnlich wie eine CASE-Anweisung werden Entscheidungstabellen sequentiell abgearbeitet. Dies bedeutet, dass, sobald das erste Mal alle in einer Entscheidungstabelle modellierten Bedingungen erfüllt sind, eine Zuweisung erfolgt und die Entscheidungstabelle verlassen wird. Bei der Erstellung von Entscheidungstabellen ist diese Logik zu berücksichtigen.

Constraints ermöglichen das explizite Ausschließen einzelner Optionen unter bestimmten Randbedingungen. Sie werden bidirektional definiert. Im System camos.Develop[®] werden sie allerdings nur als so genannte passive Constraints verwendet. Dies bedeutet, dass die Auswahlmöglichkeiten auf der Basis von Constraints eingeschränkt werden, ohne allerdings, wie es im System ENGCON angestrebt wird, über dieses Ausschlussverfahren eine eindeutige Zuweisung zu erzielen. In der Digitalen Fabrik wird eine Zuordnung der Basiselemente PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE durchgeführt. Hierbei stehen direkte Zuordnungen, wie sie über Regeln realisiert werden können, im Mittelpunkt. Constraints werden verwendet, um die Lösungsauswahl für eine manuelle Planung einzuschränken. Sie ermöglichen beispielsweise, Auswahlelemente aus einer Bibliothek abhängig von bestimmten Randbedingungen auszuschließen, um so die manuelle Planung übersichtlicher zu gestalten. Da im Rahmen dieser Arbeit die teilautomatisierte Erstellung und damit eine direkte Zuweisung im Vordergrund stehen, wird im weiteren Verlauf die Bedeutung von Constraints für die Montageplanung nicht weiter vertieft.

Für die Eignung bestimmter Elemente zur Wissensrepräsentation ist die Art des Wissens, das es abzubilden gilt, entscheidend. Ein zentrales Unterscheidungsmerkmal liegt darin, ob es sich um lokale oder objektübergreifende Beziehungen handelt. Lokale Beziehungen sind einem einzelnen Objekt zugeordnet und betreffen somit nur dieses direkt. Ein Beispiel hierfür ist die Berechnung einer Einzelzeit für einen Montageschritt in Abhängigkeit von der Anzahl der zu montierenden Bauteile. Im Gegensatz hierzu existieren auch objektübergreifende Beziehungen, wie z.B. die Berechnung der Gesamtzeit eines Arbeitsgangs als Summe der jeweiligen Zeiten der Teilarbeitsgänge.

Derartige objektübergreifende Beziehungen werden im DELMIA Process Engineer[®] über Skripte realisiert. Abbildung 61 zeigt in Anlehnung an KLAUKE (2002), wie die Berechnung der Zeit eines Arbeitsgangs als Summe der Zeiten der Teilarbeitsgänge mit Hilfe eines Skripts durchgeführt wird. Zunächst wird die Hauptfunktion in Zeile 230 aufgerufen, die auf die Unterfunktion in Zeile 90 zugreift. Daraufhin wird in Zeile 110 zunächst die Zeit auf 0 gesetzt. Im weiteren Verlauf des Programms wird das erste Kindobjekt des Arbeitsgangs, der erste Teilarbeitsgang, bestimmt. Ist dieses Element vorhanden, also die Identifikationsnummer (object_id) nicht leer, so wird zunächst die Zeitberechnung für dieses Element gestartet. Hierzu wird in die Unterfunktion in Zeile 10 gesprungen. Dort werden die beiden Merkmale *Planzeit* und *Zeitfaktor* ausgelesen. Das Produkt der beiden wird dem Teilarbeitsgang als erlaubte Zeit zugewiesen. Diese Zeit wird zur Gesamtzeit des übergeordneten Arbeitsgangs in Zeile 170 addiert, wobei die Addition solange wiederholt wird, bis Kindelemente mit nicht leerer Identifikationsnummer gefunden werden.

```

10 sub recalc_zeit(id)
20   wert=data.getattributebyid(id, "Planzeit")
30   wert4=data.getattributebyid(id, "Zeitfaktor")
40
50   wert3=wert*wert4
60   call data.setattributebyid(id, "erlaubte Zeit")
70 end sub
80
90 sub get_all_children(object_id)
100  dim zeit_gesamt
110  zeit_gesamt = 0.0
120  child_id = data.GetFirstChild(object_id, "nodes")
130  if child_id <> "" Then
140    do while child_id <> ""
150      call recalc_zeit(child_id)
160      gesamte_Zeit = gesamte_Zeit + data.getattributebyid(child_id, "erlaubte Zeit")
170      child_id = data.GetNextChild(object_id, "nodes")
180    loop
190    call data.setattribute(object_id, "erlaubte Zeit", gesamte_Zeit)
200  end if
210 end sub
220
230 sub main(id)
240   call get_all_children
250 end sub

```

Abbildung 61: Objektübergreifende Zeitberechnung in der Digitalen Fabrik am Beispiel des DELMIA Process Engineer[®] (eigene Darstellung in Anlehnung an KLAUKE 2002)

Die Berechnung berücksichtigt nur die direkten Kindelemente und nicht eventuell vorhandene Unterelemente, wie z.B. Vorgangsstufen oder -elemente (siehe Abschnitt 2.4.1). Um auch eine mehr als zweistufige Berechnung zu ermöglichen, müsste eine manuelle Berechnung bottom-up zwischen allen Eltern-Kind-Paaren erfolgen und gleichzeitig sichergestellt sein, dass sich die Anzahl oder die Zeiten der Kindelemente nicht mehr verändern.

Camos.Develop® kann die Berechnung dieser objektübergreifenden Kalkulation mit Triggern, wie sie bereits vorgestellt wurden, sehr gut unterstützen. Diese veranlassen z.B. die Berechnung eines Elementes mit zugeordneten Arbeitsvorgängen nach dem folgenden Schema:

Der Trigger überwacht alle in der Formel enthaltenen Elemente, also alle Zeiten der als Kind zugeordneten Arbeitsvorgänge. Sollte ein Arbeitsvorgang gelöscht werden bzw. neu hinzukommen oder dessen Zeit sich verändern, wird automatisch eine neue Zeitberechnung begonnen. Ein derartiger Trigger ist jeder Arbeitsfolge zugeordnet. Daher ist es möglich, auf diese Weise beliebig tiefstufige Detailhierarchien aufzusummieren (siehe Abbildung 62).

```
10 sum_te:= 0;
20 for i := 1 to maxindex(_AVO[]) do
30 sum_te := sum_te + _AVO[i].te;
40 endfor;
```

Abbildung 62: Objektübergreifende Zeitberechnung in einem spezifischen wissensbasierten System

Wie in Abschnitt 5.3 erläutert, werden alle Elemente in einem wissensbasierten System top-down, beginnend von einem Startpunkt und entsprechend ihrer gültigen Beziehungen, erstellt. Dies bedeutet, dass zunächst ein Arbeitsgang erzeugt und dann überprüft wird, welche Teilarbeitsgänge auf der Basis von Beziehungswissen gültig und in Konsequenz ebenfalls anzulegen sind. Bei jeder Erstellung solcher Kindelemente wird der Trigger zur Summenberechnung erneut ausgelöst. Daraus resultiert, dass das Laufzeitverhalten eines Systems bei großen Modellen mit vielen Elementen stark beeinträchtigt werden kann. Dieser Effekt tritt insbesondere bei der wissensbasierten Montageplanung auf, da hier drei verschiedene Objektbäume für PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE gleichzeitig zu verarbeiten sind. Somit ist anzustreben, dass objektübergreifende Berechnungen erst dann ausgelöst werden, wenn alle Elemente des jeweiligen Baumes initial erzeugt worden sind.

Abbildung 63 zeigt, wie Programmausführungen mit Hilfe von Timern realisiert werden können. Bei jeder Einzelzeit eines Teilarbeitsvorgangs ist ein Zuweisungstrigger hinterlegt, der das Merkmal *DoOnce* auf 1 setzt (Schritt 1), die Aktivschaltung eines weiteren Triggers bewirkt und auf diese Weise Schritt 2 auslöst. Durch die im Zuweisungstrigger hinterlegte Methode wird das Merkmal *DoOnceDone* mit dem Wert 1 belegt. Hierdurch ist die abgefragte IF-Bedingung nur beim ersten Aufruf erfüllt, da bei jedem weiteren Aufruf (z.B. durch Schritt 4 und 5) die Bedingung *DoOnceDone* nicht 0 ist. Durch den enthaltenen Timer wird die beim ersten Aufruf gestartete Methode SUMME() solange verzögert, bis alle Initialobjekte (TAVO 2 und TAVO 3) erzeugt wurden. Diese geringe Verzögerung wird vom Nutzer nicht wahrgenommen, stellt aber sicher, dass die Methode zu Beginn nur einmal aufgerufen wird, später aber bei jeder Veränderung an Teilarbeitsvorgängen oder deren Zeiten eine Neuberechnung ausgelöst wird. Zeitlich verzögert wird Schritt 6 begonnen, der die objektübergreifende Berechnung ausführt und im Anschluss daran in Schritt 7 das Merkmal *DoOnceDone* wieder auf Null setzt.

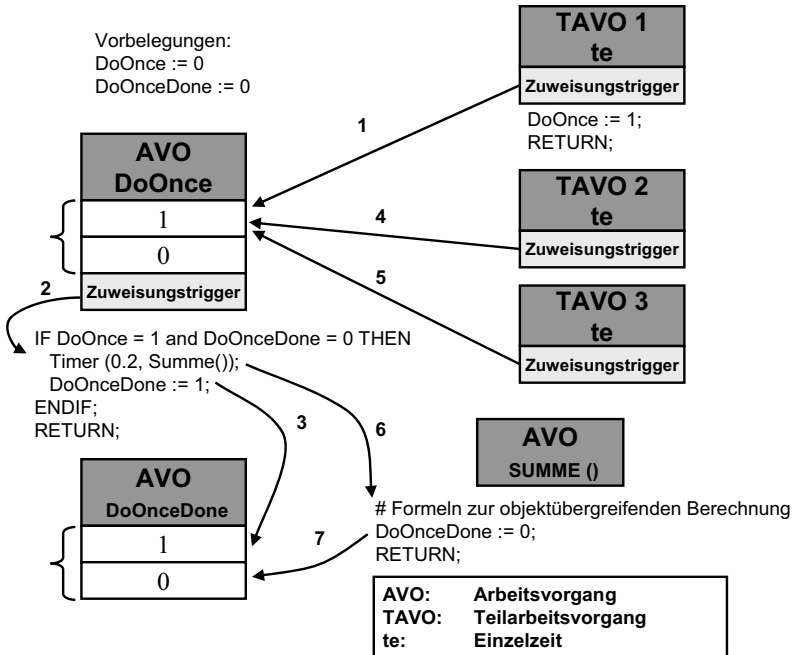


Abbildung 63: Einmaliger Aufruf von Summierungen in *camos.Develop*[®]

6.4.2 Verarbeitung des Planungswissens

6.4.2.1 Allgemeines

Da Klassen nicht in eine offene Basis importiert werden können, sind im Entwicklungssystem zwei unterschiedliche Wissensbasen zu erstellen. Zum einen wird eine Wissensbasis benötigt, in der die zur Instanzierung der Objekte erforderlichen Methoden hinterlegt sind. Sie soll im Folgenden als *Planungssystem* bezeichnet werden. Zum anderen ist eine Wissensbasis erforderlich, in der die aus den XML-Dateien importierten Daten abgelegt werden können. Sie wird entsprechend ihrer Funktion als Datenspeicher mit der Bezeichnung *Datenbasis* versehen und wird als Bibliothek direkt in das Planungssystem eingebunden. Damit stehen alle Elemente aus dieser Wissensbasis im Planungssystem zur Verfügung.

Die Realisierung des Imports der XML-Dokumente sowie die anschließende Erstellung der Prozess- und Produktstruktur werden im Folgenden nicht im Detail erläutert. Anhand der nachfolgend aufgeführten Schritte soll lediglich ein grober Überblick über das für die Abbildung des Montageprozesses in *camos.Develop*[®] notwendige konzeptionelle Vorgehen gegeben werden. Es lassen sich im Wesentlichen drei unterschiedliche Aufgabenbereiche voneinander abgrenzen, die nun im Detail erläutert werden.

6.4.2.2 Import der Klassenstruktur und der Merkmalsausprägungen aus den beiden Zielschemata

In der Datenbasis werden aus den in einer strukturierten Form in einem XML-Dokument vorliegenden Daten die entsprechenden Elemente im Klassenbaum erzeugt. Die in Abbildung 64 skizzierte logische Struktur setzt sich aus den Objekt- und den Basisklassen zusammen. Die übergeordneten Objektklassen sind in der Datenbasis bereits vordefiniert und können somit als Komponenten im Planungssystem hinterlegt werden.

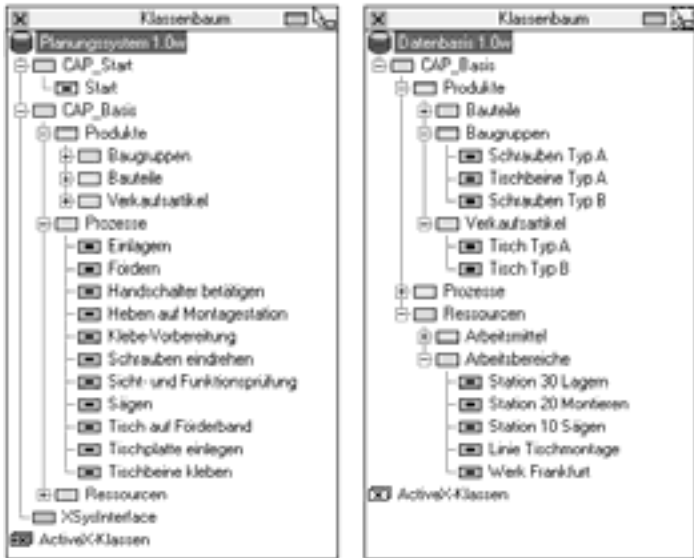


Abbildung 64: Klassenbaum von Planungssystem und Datenbasis in *camos.Develop*[®]

Die Basisklassen, also die jeweiligen Produkte, Prozesse und Ressourcen, werden in Abhängigkeit vom Inhalt der XML-Datei generiert. Ihr Import in das Entwicklungssystem ist über eine spezielle Importfunktion realisiert. Nach diesem Schritt sind sie im Klassenbaum vorhanden, besitzen jedoch noch keinen Inhalt. Somit müssen zusätzlich die spezifischen Merkmalsausprägungen der jeweiligen Klassen importiert werden. Hierfür wird das zweite vom BizTalk Server bereitgestellte XML-Dokument verwendet. Es enthält die Ausprägungen und Vorbelegungen der unterschiedlichen Merkmale in der von *camos.Develop*[®] benötigten Importstruktur. Anhand des Prozesses *Sicht- und Funktionsprüfung* wird in Abbildung 65 exemplarisch der vollständig definierte Strukturbaum nach dem erfolgreichen Datenimport aufgezeigt.



Abbildung 65: Strukturbaum des Prozesses Sicht- und Funktionsprüfung in *camos.Develop*[®]

6.4.2.3 Erzeugung der variantenspezifischen Produkt-, Prozess- und Ressourcenstruktur

Nachdem sämtliche Informationen über die einzelnen Elemente im Entwicklungssystem vorliegen, können mit Hilfe verschiedener Methoden die Prozess- sowie die Produktstruktur erzeugt werden. Bei ihrer Erstellung ist der ausgewählte Variantensatz zu berücksichtigen, da sowohl für den Tisch Typ A als auch für den Tisch Typ B die Grunddaten im System vorliegen. Die Abbildung der Prozessstruktur erfolgt hierbei über die im Strukturbaum hinterlegten Merkmale INPUT und OUTPUT sowie PARENT und CHILDREN. Anhand verschiedener Prozeduren werden die hinterlegten Merkmalsausprägungen abgefragt und über mehrere Schleifen die Vorgänger und Nachfolger auf derselben sowie auf der untergeordneten Hierarchieebene ermittelt. Ist der notwendige Programmcode hinterlegt, können während des Interpreterlaufs die entsprechenden Objekte in-

stanziert werden. Die Ermittlung der Produktstruktur verläuft weitestgehend analog zu dem soeben beschriebenen Prozess.

6.4.3 Erstellung der Benutzeroberfläche

Die erfolgreiche Instanziierung der zu erzeugenden Objekte kann bisher ausschließlich im systeminternen Debugger von camos.Develop[®] überprüft werden. In einem letzten Schritt muss daher dem Systemanwender eine geeignete Benutzeroberfläche zur Verfügung gestellt werden. Hierfür sind verschiedene Masken zu erzeugen, die eine Darstellung der Prozess- und der Produktstruktur sowie der jeweils mit dem Objekt verbundenen Elemente, die in Form der Merkmalsausprägungen hinterlegt sind, ermöglichen. Über die Definition von Ergebnissen können zusätzlich ein Montagearbeitsplan sowie eine Montagestückliste auf dem Bildschirm angezeigt sowie über einen Drucker ausgegeben werden. Die Benutzeroberfläche soll im Rahmen der Realisierungsphase detailliert betrachtet werden.

6.5 Realisierung des Systems GenPlanner

Auf der Basis dieser Systemauswahl wurde ein Feinkonzept erarbeitet, das in Form des Softwareprototyps GenPlanner (Generischer Planner) umgesetzt wurde. Das System nutzt dabei Grunddaten, die aus der Standardkonfiguration des eM-Planner[®] übernommen werden. Diese werden in ein Arbeitsplanungssystem überführt, das entsprechend den Anforderungen aus Kapitel 4 und auf der Basis von camos.CAPP und camos.Develop[®] entwickelt wurde. Bei der Realisierung dieses Systems, das im folgenden GenPlanner genannt wird, werden die Methoden, die in Abschnitt 5.3 erarbeitet wurden, softwaretechnisch umgesetzt. Eine wichtige Anforderung ist die Anwendung einer Baukastenstruktur, die die Erstellung von Varianten ermöglicht. Die softwaretechnische Umsetzung wird im Folgenden am Beispiel des Planungsproduktes erläutert, dessen Strukturbaum in Abbildung 66 skizziert ist.

Als Komponenten sind sowohl Baugruppen als auch Bauteile möglich. Für die aus dem eM-Planner[®] übernommenen Produkte sollen allerdings nur Objekte zugeordnet werden, die auch Kindelemente des jeweiligen Objektes sind.

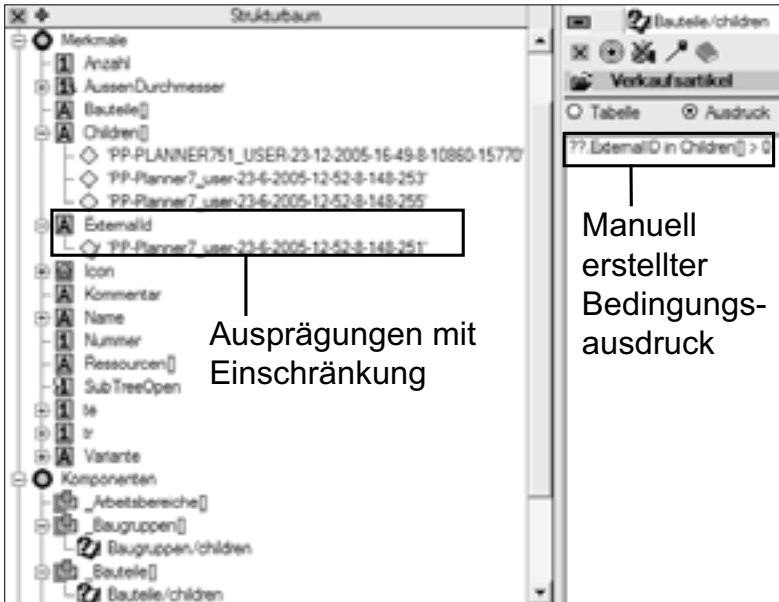



Abbildung 66: Strukturbaum der Klasse PRODUKT im selbst entwickelten System GenPlanner

Aus diesem Grund werden mögliche Ausprägungen mit Einschränkung übernommen. Hierdurch ist es möglich, die Auswahl an Klassen in Abhängigkeit von bestimmten Bedingungen zu reduzieren. Während des Interpreterlaufs wird die Ausprägung mit Einschränkung aufgelöst, d.h. der Interpreter vergleicht die Vorgelegungen jeder potenziellen Klasse mit der angegebenen Einschränkung. Sie wird mit dem Symbol  in den Strukturbaum unterhalb der Komponente übernommen. Im Einschränkungseditor können Bedingungen in Tabellenform oder manuell als Ausdruck definiert werden. Wie aus Abbildung 66 hervorgeht, wird die Bedingung `??ExternalID in Children[] > 0` verwendet. Es werden also nur Kindelemente als mögliche Baugruppen oder -teile definiert, deren Merkmal *ExternalID* auch ein Element in CHILDREN der Vorgängerklasse ist.

Die möglichen Kindelemente werden in einem zweiten Schritt über eine Methode erzeugt. Alternativ könnten sie auch direkt erstellt werden, allerdings wäre es in diesem Fall nicht möglich, Sortierungen durchzuführen und die Elemente würden zudem immer in der Reihenfolge generiert werden, in der sie in der Bibliothek abgelegt sind. Aus diesem Grund wird der Zwischenschritt über die Defini-

tion möglicher Kinder gewählt. Nach der Erzeugung eines Objektes wird die Methode *ppStrukturAnlegen* ausgelöst, die in Abbildung 67 visualisiert ist.

Diese Methode schreibt in Zeile 3 und Zeile 8 alle erlaubten Baugruppen und -teile in eine temporäre Liste (*validItemsBG[]* bzw. *validItemsBT[]*) und erzeugt sie für das jeweilige Objekt. Baugruppen bestehen wie Produkte aus weiteren Baugruppen oder -teilen. Daher gilt für sie der gleiche Strukturbaum wie für Produkte. Bauteile stellen dagegen in der Produkthierarchie die unterste Ebene dar und bestehen aus keinen weiteren Elementen. Auf diese Weise wird ein stufenweises Erzeugen der Gesamtproduktstruktur ermöglicht, das der in Abbildung 51 vorgestellten Methode entspricht.

```

(1)  zGetValidItems (“_Baugruppen[]“, validItemsBG[]);
(2)  zGetValidItems (“_Bauteile[]“, validItemsBT[]);
(3)  IF validItemsBG[] = ANYVALUE THEN
(4)    FOR i := 1 TO MaxIndex (validItemsBG[]) DO
(5)      _Baugruppen [i] := validItemsBG[i];
(6)    ENDFOR;
(7)  ENDIF;
(8)  IF validItemsBT[] = ANYVALUE THEN
(9)    FOR i := 1 TO MaxIndex (validItemsBT[]) DO
(10)     _Bauteile [i] := validItemsBT[i];
(11)   ENDFOR;
(12) ENDIF;

```

Abbildung 67: Methode *ppStrukturAnlegen* im selbst entwickelten System *GenPlanner*

6.6 Fallstudie

6.6.1 Allgemeines

Das System *GenPlanner* wurde anhand realer Beispiele aus der frühen Phase der Prozessplanung in der Automobilindustrie auf seine Praxistauglichkeit überprüft. Im Vordergrund der Untersuchung standen hierbei zwei Hauptanwendungsgebiete. Zunächst sollte überprüft werden, ob durch die variable Baukastenstruktur eine höhere Flexibilität und schnellere Modellierung des Variantenspektrums möglich wird. Im Anschluss daran wurde untersucht, ob durch die wissensbasierte Überwachung einzelner Merkmale eine bessere Integration von Produkt- und

Prozessplanung erreicht werden kann. Hierzu wurde zunächst ein realer Anwendungsfall aus der frühen Phase der Montageplanung beispielhaft im eM-Planner[®] modelliert. Die in Abbildung 68 dargestellten Montageschritte gelten in Abhängigkeit von der gewählten Grundvariante eines Fahrzeuges und der zugeordneten Sonderausstattung, wie z.B. für einen bestimmten Radiotyp. Ein weiterer betrachteter Fall ist die Variantenplanung der Abgasanlage in Abhängigkeit vom gewählten Motor.

6.6.2 Realisierung der Standardplanungsfunktionen mit dem wissensbasierten System

Die hierbei hinterlegten Planungsdaten wurden als ungefilterte Maximalstruktur (siehe Abbildung 68) über die in Abschnitt 6.3.3 entwickelte Schnittstelle an das System GenPlanner übergeben. Dort können sie zunächst genutzt werden, um eine identische Planung, wie sie mit dem eM-Planner[®] möglich ist, durchzuführen. Die Abbildung der aus dem eM-Planner[®] übernommenen Grunddaten erfolgt hierbei mit der in Abschnitt 6.5 vorgestellten Verknüpfung über die *ExternalID*.

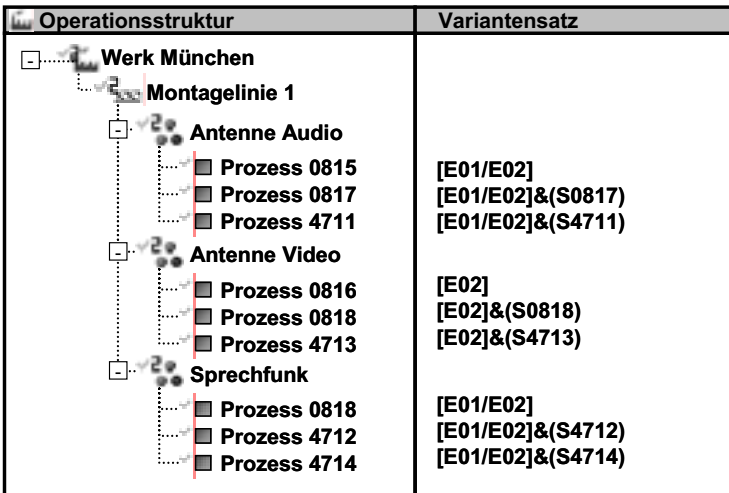


Abbildung 68: Anwendungsbeispiel einer Montageplanung im eM-Planner[®]

6.6.3 Realisierung erweiterter Funktionalitäten

Die zusätzlichen Möglichkeiten der wissensbasierten Planung gehen über eine automatische Aufsummierung von Einzelzeiten bei Veränderungen, wie sie in Abschnitt 6.4 erläutert wurden, weit hinaus. Im Folgenden werden drei Beispiele für die Vorteile der generischen Planung gegenüber bisherigen Planungsansätzen in der Digitalen Fabrik vorgestellt. Diese sind im Einzelnen:

- Hinterlegung von regelbasierten Abhängigkeiten bis auf Merkmalsebene
- Flexible Abbildung von Variantenstrukturen
- Überprüfung von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Klassen

Hinterlegung von regelbasierten Abhängigkeiten bis auf Merkmalsebene

Für die Abbildung identischer Prozesse, die bei unterschiedlichen Varianten verschiedene Ausführungszeiten erfordern, sind im eM-Planner[®] mehrere Prozesse anzulegen, denen entsprechende Variantensätze und Ressourcen zugeordnet werden müssen. Im Gegensatz hierzu ist es in wissensbasierten Systemen, wie z.B. dem entwickelten System GenPlanner, möglich, neben Objekten auch einzelne Merkmale, wie z.B. die Einzelzeit in Abhängigkeit vom Variantensatz, zu beregeln. Dies ist in Abbildung 68 beispielhaft skizziert. Die Möglichkeiten der Regelzuordnung gehen allerdings weit über die Zuordnung von Variantensätzen wie beim eM-Planner[®] hinaus. So ist es des Weiteren möglich, Planungswissen in Abhängigkeit von ergonomischen oder technischen Randbedingungen abzubilden (siehe Abbildung 69).

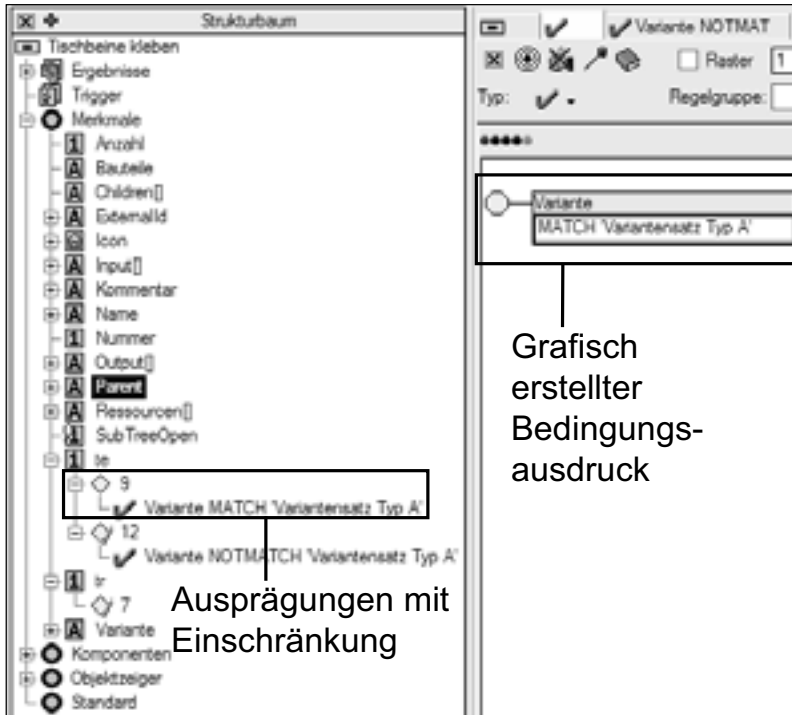


Abbildung 69: Regelbasierte Zuordnung von unterschiedlichen Prozesszeiten zu einem Prozesselement im GenPlanner

Durch eine derartige generische Zuordnung entfällt eine projektspezifische Zuordnung von Variantencodes, da z.B. auf der Basis eines zu hebenden Bauteils in Abhängigkeit vom Gewicht entsprechende Zeiten zugeordnet werden. Diese allgemeingültigen Abhängigkeiten gelten über ein Projekt hinaus und erleichtern folglich die Weitergabe des Planungswissens zwischen verschiedenen Projekten. Neben einer Standardisierung von Produkt-, Prozess-, und Ressourcenstrukturen, wie sie von JONAS (2000) und KLAUKE (2002) gezeigt wurde, wird so zusätzlich eine Reproduzierbarkeit der Planzeiten in der frühen Phase der Montageplanung erzielt.

Flexible Abbildung von Variantenstrukturen

Wenn die Reihenfolge von Prozessen variantenspezifisch erfolgt, muss eine sehr aufwendige Maximalstruktur angelegt werden. In diese werden identische Objekte in den jeweiligen Positionen eingefügt, die über Variantencodes entsprechend ausgefiltert werden können. Dies soll anhand eines anschaulichen Beispiels verdeutlicht werden, das in Abbildung 70 schematisch skizziert ist.

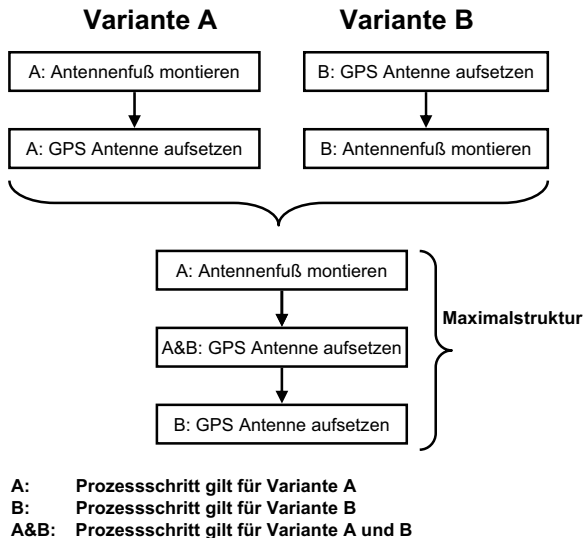


Abbildung 70: Prinzip der Maximalstruktur einer Prozessfolge

Um zwei variantenspezifische Prozessfolgen mit identischen, aber vertauschten Prozessschritten abbilden zu können, ist es erforderlich, drei Prozessschritte zu modellieren. Der hierdurch entstehende Aufwand steigt mit einer größeren Anzahl an unterschiedlichen Varianten und spezifischen Reihenfolgen erheblich. Die Reihenfolge von Kindelementen kann bei wissensbasierten Systemen mit Hilfe eines Indexes zur Laufzeit gesteuert werden. Dies bedeutet, dass Objekte nicht doppelt angelegt und deren Verknüpfungen nicht neu festgelegt werden müssen, sondern mit Hilfe eines über eine Regel gesteuerten Indexes in der Reihenfolge erzeugt werden, die für die jeweilige Variante gültig ist. Eine beispielhafte Realisierung ist in Abbildung 71 veranschaulicht. Für die Variante A gilt in diesem Beispiel die Prozessreihenfolge „Einlagern vor Fördern“, während dies für die Variante B genau umgekehrt ist.

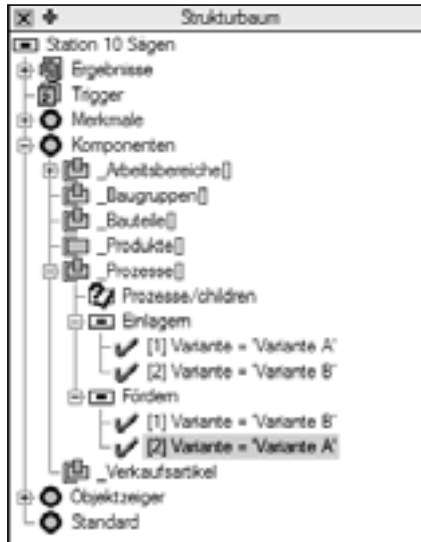


Abbildung 71: Regelbasierte Baukastenstruktur zur Abbildung einer variantenspezifischen Prozessfolge im GenPlanner

Überprüfung von Abhängigkeiten zwischen verschiedenen Klassen

Ein Hauptanwendungsgebiet der integrierten Montageplanung liegt im Simultaneous Engineering, bei dem Produkte und deren Montageanlagen zeitlich überlappend geplant werden. Nach dem heutigen Stand der Technik werden dabei Planungsstände des Produktes in das Montageplanungstool importiert. Geänderte Daten werden in Abhängigkeit von der Tatsache, ob es sich um neue, geänderte oder gelöschte Teile handelt, in entsprechenden Ordnern hinterlegt. Die Aufgabe des Planers besteht darin, manuell zu überprüfen, ob z.B. durch eine geänderte Produktspezifikation eine Neuplanung der Montageanlage in Teilbereichen notwendig ist. Dies stellt einen aufwändigen, manuellen und damit fehleranfälligen Prozess dar. Mit Hilfe wissensbasierter Methoden ist es jedoch möglich, Planungsgrenzen als Beziehungswissen zu hinterlegen. Hierdurch kann der Planer gezielt auf diejenigen Veränderungen (z.B. am Produkt) hingewiesen werden, die über die möglichen Grenzen bisheriger Planung hinausgehen.

6.7 Nutzenbewertung

Eine monetäre Bestimmung des Nutzens der Digitalen Fabrik und damit auch der wissensbasierten Montageplanung ist stark unternehmensspezifisch und aktuell im Fokus verschiedener wissenschaftlicher Arbeiten (SCHRAFT & KUHLMANN 2006, ZÄH & SCHACK 2006). Daher beschränkt sich die Nutzenbestimmung in dieser Arbeit auf qualitative Aspekte. EIGNER & STELZER (2001) nennen hierfür die folgenden vier Faktoren, die betriebspezifisch zu bewerten sind.

Zeit

Im Rahmen von PLM-Einführungen können Einsparungen bei der Gesamtplanungszeit von Projekten von 10 bis 30 % realisiert werden. Eine noch größere zeitliche Reduktion des Engineerings von 20 bis 80 % wird durch den Einsatz von regelbasierten Systemen erwartet (MACKRELL 2005b). Neben dieser reinen Einsparung der Prozesszeit des Engineerings, die noch vergleichsweise leicht monetär quantifizierbar wäre, werden darüber hinaus auch Verzögerungen in Entwicklungsprojekten reduziert, so dass Unternehmen in Zukunft schneller mit neuen Produkten auf den Markt kommen können. Die Fähigkeit, als erster oder zweiter Anbieter ein innovatives Produkt präsentieren zu können, ist im Wettbewerb oftmals entscheidend, kann aber nur schwer monetär bewertet werden.

Qualität

Laut EIGNER & STELZER (2001) sind 10 % der Fertigungsfehler im allgemeinen Maschinenbau auf den Zugriff auf alte Datenbestände zurückzuführen. Insbesondere die frühe Beseitigung von Fehlern im Entwicklungsprozess kann zu einer großen Kosteneinsparung im Vergleich zu späteren Änderungen im Lebenszyklus führen. Die Gartner Group nennt in diesem Zusammenhang Einsparungen in Höhe von 2 bis 5 % vom Jahresumsatz, die durch Qualitätsverbesserungen erzielt werden können. Diese lassen sich zum Beispiel durch vermiedene Fehler und einem daraus resultierenden geringeren Nacharbeitsaufwand schnellere Abläufe realisieren.

Wiederverwendung

Ein großer Teil der Planungsprojekte setzt sich aus existierenden oder geringfügig geänderten Produkten, Prozessen und Ressourcen zusammen. Das Einsparpotenzial durch optimiertes Suchen bei der Wiederverwendung von Planungselementen wird in der Industrie auf ca. 10 % geschätzt (EIGNER & STELZER 2001).

BLEY & FRANKE (2001) erwarten durch die Nutzung von bereits existierenden Teilmodellen sogar mögliche Einsparungen von bis zu 30 %.

Synergie

Durch die konsequente Nutzung eines wissensbasierten Planungssystems werden Synergieeffekte, wie z.B. detailliertere und transparentere Informationen, bessere Entscheidungsunterstützung sowie reduzierte und vor allem eine frühere Änderungsdurchführung, freigesetzt.

Fazit

Die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit basiert auf einer Abwägung des Kosten-/Nutzenverhältnisses. Dabei gliedert sich der Nutzen in quantifizierbare und nicht quantifizierbare Bestandteile. Zum nicht quantifizierbaren Nutzen sind zum Beispiel die Erhöhung der Datenaktualität und die verbesserte Versorgung mit Informationen zu zählen. Quantifizierbarer Nutzen gliedert sich sowohl in Bestandteile, die monetär bewertbar sind als auch in solche, die nicht monetär bewertet werden können. Als Beispiele für finanziell bewertbare Vorteile können z.B. die Reduzierung von Überstunden oder die Verringerung der Kosten für den Prototypenbau sowie Personalverringerungen angeführt werden. Dagegen ist eine Vielzahl von Effekten nicht direkt monetär bewertbar, wie z.B. weniger Terminüberschreitungen oder eine höhere Anzahl an abgeglichenen Projektmeilensteinen.

Das vorgestellte Konzept der wissensbasierten Montageplanung ist insbesondere für variantenreiche Planungen mit einer hohen Anzahl von Änderungen während des Projektverlaufes geeignet. Ein besonderer Vorteil liegt in der strukturierten Übernahme von Planungsgrunddaten aus früheren ähnlichen Projekten. Insbesondere die von den Automobilherstellern angekündigten Variantenoffensiven und die Produktion in global verteilten Standorten lassen ein hohes Nutzenpotenzial der wissensbasierten Montageplanung erkennen.

In der vorliegenden Arbeit wurden in Kapitel 4 vier zentrale Forderungen an die wissensbasierte Montageplanung aufgestellt:

1. Die wissensbasierte Montageplanung muss auf einer erzeugenden Variantenplanung basieren.
2. Es müssen die Grundtechniken der Objektorientierung unterstützt werden.
3. Es müssen unterschiedliche Formen der Wissensrepräsentation unterstützt werden, die in Abhängigkeit von der konkreten Aufgabenstellung verwendet werden.
4. Bei der Entwicklung der Methode muss bereits deren Umsetzbarkeit mit heute am Markt verfügbaren Systemen berücksichtigt werden.

Auf dieser Basis wurde in Kapitel 5 eine Methode und ein Werkzeugkonzept zur Realisierung dieser Anforderungen erarbeitet, dessen Umsetzung in dem Softwareprototyp GenPlanner in Kapitel 6 beschrieben wurde. Als Ergebnis lässt sich festhalten, dass alle Anforderungen erfüllt werden konnten. Es wurde gezeigt, dass sich die grundlegenden Funktionen heutiger kommerzieller Systeme der Digitalen Fabrik (siehe Abschnitt 5.2) mit Hilfe des erzeugenden Ansatzes in einem wissensbasierten System realisieren lassen. Dank eines dateibasierten Datentransfers können hierzu alle relevanten Planungsgrunddaten mit ihren Verknüpfungen in die entwickelte wissensbasierte Planungsumgebung GenPlanner übernommen und dort direkt verarbeitet werden. In Abschnitt 6.6.3 wurde darüber hinaus gezeigt, dass eine Vielzahl zusätzlicher Funktionen, wie z.B. konsistente objektübergreifende Summierungen, in diesem System unterstützt werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Aufgrund der zunehmend gesättigten Märkte wird in einer Vielzahl von Branchen die Produktdiversifizierung weiter voranschreiten und es werden zusätzlich die Produktlebenszyklen verkürzt werden. Die Kombination dieser Tendenzen führt zu einem besonderen Spannungsfeld in der Montageplanung, deren Aufgabe primär darin besteht, in enger Verzahnung mit der Produktentwicklung wirtschaftliche und flexible Montagesysteme für unterschiedliche Produkt- und Standortvarianten zu planen.

Für die Unterstützung dieser Aufgabe wurden Prozessplanungssysteme im Rahmen der Digitalen Fabrik entwickelt, die insbesondere das Simultaneous Engineering in großen Teams aus den Bereichen Produktentwicklung und Prozessplanung unterstützen. Bestehende Ansätze basieren auf einem Planungsvorgehen, bei dem die Verknüpfungen zwischen den betrachteten Klassen PRODUKT, PROZESS und RESSOURCE manuell erstellt werden und das Wissen, in welcher Weise spezielle Beziehungen oder Merkmalswerte gelten, nur implizit im Erfahrungsschatz der Planer vorliegt. Diese Tatsache erschwert eine Wiederverwendbarkeit des Planungswissens, die aufgrund der Zunahme an Varianten und der Verkürzung von Produktlebenszyklen immer wichtiger wird.

Es ist davon auszugehen, dass zukünftig Planungen zu einem Großteil in Form einer Lösungskonfiguration über Standardbibliotheken erfolgen. Diese bestehen nicht nur aus parametrischen Fertigungsmittelgeometrien, sondern beschreiben die einzelnen Bausteine auch hinsichtlich ihres Verhaltens z.B. für Ablauf- oder Geometriesimulationen. Um die Prozessplanung für die gestiegenen Anforderungen, die sich aus derartigen Planungsanforderungen ergeben, zu qualifizieren, sind neue Ansätze und Methoden zu verfolgen. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit untersucht, welche Formen der Wissensrepräsentation von bestehenden kommerziellen Prozessplanungssystemen der Digitalen Fabrik unterstützt werden. Hierbei wurde deutlich, dass bisher nur objektorientierte Beschreibungen und prozedurales Wissen abgebildet werden. Zur Unterstützung der klassischen Arbeitsplanung werden so genannte Computer Aided Process Planning-Systeme (CAPP-Systeme) verwendet, die eine deutlich längere Entwicklungsgeschichte als die Digitale Fabrik zu verzeichnen haben. Aufgrund dieser langjährigen Entwicklungsgeschichte werden in diesem Bereich vielfältige Formen der Wissensrepräsentation, wie z.B. wissensbasierte Methoden, unterstützt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Konzept entwickelt, das veranschaulicht, wie mit einer dateibasierten Integration ein kommerzielles Prozessplanungssystem um wissensbasierte Elemente erweitert werden kann. Hierzu wurde eine Möglichkeit zur Überführung der Grunddaten einer digitalen Prozessplanung aus einem kommerziellen Prozessplanungswerkzeug der Digitalen Fabrik in das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte System GenPlanner geschaffen. Anhand eines Fallbeispiels aus dem Automobilbereich wurde aufgezeigt, dass mit Hilfe des wissensbasierten Systems GenPlanner bestehende Grundfunktionalitäten kommerzieller Prozessplanungswerkzeuge unterstützt werden. Neben diesen Grundfunktionen eines Prozessplanungswerkzeuges der Digitalen Fabrik kann der Anwender darüber hinaus von einer Vielzahl manueller Tätigkeiten entlastet werden. Ein weiterer Vorteil besteht in der Möglichkeit, Planungswissen zwischen verschiedenen Projekten vereinfacht zu übertragen. Hierdurch lässt sich eine aufwändige manuelle Neuerstellung von Planungsstrukturen oder eine alternative Übernahme bestehender Projekte mit einer manuellen Anpassung durch ein erzeugendes Vorgehen ersetzen. Somit wird eine Planung auf der Basis von allgemeinen Unterlagen und nicht auf der Grundlage früherer Ergebnisse ermöglicht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde die Vorteilhaftigkeit wissensbasierter Methoden für die digitale Prozessplanung im Automobilbereich belegt. Für die Realisierung wurde eine Schnittstelle geschaffen, um die Daten in ein wissensbasiertes System übernehmen zu können. In Zukunft ist eine Systemkonsolidierung von PLM-Systemen und Prozessplanungssystemen anzustreben, der die Einführung zusätzlicher, über Schnittstellen angebundener Planungswerkzeuge widerspricht. Folglich hat das entwickelte System GenPlanner nicht das Ziel, kommerzielle Systeme wie den eM-Planner[®] zu ersetzen, sondern die Machbarkeit und Vorteilhaftigkeit einer wissensbasierten Montageplanung aufzuzeigen. Zukünftig sollten die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Ansätze der wissensbasierten Planung in kommerzielle Systeme integriert werden. Ein Grund hierfür ist unter anderem, dass diese Prozessplanungswerkzeuge bereits über eine umfassende Einbindung in die Simulationssysteme der jeweiligen Hersteller verfügen und damit ein fester Bestandteil der Produktentstehung im Automobilbau geworden sind.

Es besteht weiterer Forschungsbedarf in Bezug darauf, wie die verschiedenen Bereiche Produkt- und Prozessplanung methodisch insbesondere im Bereich der Variantenabbildung miteinander verknüpft werden können. So werden Varianten von parametrischen Bauteilen und -gruppen zwar in CAD-Systemen erzeugt, allerdings nur als jeweils diskrete Instanz in PLM-Systemen verwaltet. Eine ähnli-

che Herausforderung existiert für die Prozessplanung in der Abbildung der Fertigungsressourcen, die ebenfalls als parametrische CAD-Daten vorliegen, bisher aber nicht konsistent mit ihrer Varianz in Prozessplanungswerkzeuge eingebunden werden. Ein weiterer viel versprechender Ansatz besteht in der Rückführung der Erfahrungen aus der Serienplanung in die frühe Phase der Planung. Hierdurch lassen sich Anpassungen, die bisher in einer detaillierten Feinplanung nötig wurden, in die Grobplanung einer ähnlichen oder direkt nachfolgenden Produkt- und Prozessentwicklung überführen.

Allgemeingültig lassen sich notwendige Forschungsarbeiten wie folgt definieren: In Zukunft müssen mehr Produktvarianten, die in ihrer Summe die gleiche Stückzahl an Gesamtprodukten wie bisher ergeben, zu wettbewerbsfähigen Kosten geplant werden können. Im Bereich der Fertigung werden vergleichbare Anforderungen z.B. durch eine Kommunalitätsstrategie gelöst. Des Weiteren ist es zukünftig erforderlich, dass dieser Ansatz einer Gleichteilenutzung von Planungsobjekten durch die Digitale Fabrik unterstützt wird. Dabei ist es nicht ausreichend, dass Elemente in einer Standardbibliothek vorliegen und manuell ausgewählt und zugewiesen werden können. Vielmehr sollte die Zuordnung und der Abgleich, ob die Objektverknüpfung über die verschiedenen Iterationsstufen einer integrierten Produkt- und Montageplanung ihre Gültigkeit behält, zumindest teilautomatisiert erfolgen. Hierfür stellen wissensbasierte Methoden und Systeme einen zentralen Ansatz dar, den es weiter zu verfolgen gilt, z.B. mit einer automatisierten Erzeugung von Montagevorrangrafen und deren Überprüfung im Planungsprozess.

8 Literaturverzeichnis

ADAMY 2005

Adamy, J.: Fuzzy Logik, neuronale Netze und evolutionäre Algorithmen. Aachen: Shaker 2005.

ALDERS 2006

Alders, K.: Gestaltung optimaler Variantenvielfalt - ein ganzheitlicher Ansatz des Variantenmanagements. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement. 1. Aufl. München: Utz 2006, S. 4/1-4/15. (*iwb* Seminarberichte 82).

ALTING ET AL. 1988

Alting, L.; Zhang, H.-C.; Lenau, T.: XPLAN - An Expert Process Planning System and its further Development. In: Davies, B. J. (Hrsg.): Twenty-Seventh International Machine Tool Design and Research Conference. New York: New York University Press 1988, S. 155-163.

ALZAGA & DIEZ 2005

Alzaga, A.; Diez, F. J.: Information System for the Engineering of Automotive Assembly Lines. In: ProSTEP iViP Association (Hrsg.): ProSTEP iViP Science Days 2005. Böblingen: Kessler 2005, S. 198-207.

AMMER 1985

Ammer, E.-D.: Rechnerunterstützte Planung von Montageablaufstrukturen für Erzeugnisse der Serienfertigung. Berlin: Springer 1985.

AREZOO ET AL. 2000

Arezoo, B.; Ridgway, K.; Al-Ahmari, A. M. A.: Selection of cutting tools and conditions of machining operations using an expert system. *Computers in Industry* 42 (2000) 1, S. 43-58.

ARNOLD ET AL. 2005

Arnold, V.; Dettmering, H.; Engel, T.; Karcher, A.: Product Lifecycle Management beherrschen: Ein Anwenderhandbuch für den Mittelstand. Berlin: Springer 2005.

AUERBACH 2005

Auerbach, D.: Digitale Fabrik in heterogenen Engineering-Netzwerken. 2. Fachkongress Digitale Fabrik. Ludwigsburg 28.-29. Juni 2005.

AWF 1968

AWF: Handbuch der Arbeitsvorbereitung: Teil 1 Arbeitsplanung. Berlin: Beuth 1968.

BEG & SHUNMUGAM 2002

Beg, J.; Shunmugam, M. S.: An Object Oriented Planner for Inspection of Prismatic Parts - OOPIPP. *Advanced Manufacturing Technology* 19 (2002) 12, S. 905-916.

BENDER 2005

Bender, K.: PDM und Engineering-Informationssysteme - Vorlesungsskriptum itm <<http://www.itm.tum.de/lehre/pdm-und-engineering-informationssysteme/download/default.asp>> - 23.03.2006.

BERNARD & PERRY 2003

Bernard, A.; Perry, N.: Fundamental concepts of product/technology/process informational integration for process modelling and process planning. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing* 16 (2003) 7/8, S. 557-565.

BLENCKE ET AL. 2002

Blencke, L.; Hornberg, O.; Iselborn, B.; Krüger, J.; Mühl, G.; Vettermann, S.; Schreiber, A.: Integrationsdienste für den Digitalen Master. In: Krause, F.-L. (Hrsg.): Abschlussbericht Juli 2002 - Integrierte Virtuelle Produktentstehung. München: Hanser 2002, S. 82.

BLEY & FRANKE 2000

Bley, H.; Franke, C.: Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik. In: VDI (Hrsg.): VDI-Fachtagung "Produkte entwickeln im realen Umfeld". München, 09.-10. November 2000. Düsseldorf: VDI Verlag 2001, S. 181-197. (VDI Berichte 1569).

BLEY & FRANKE 2001

Bley, H.; Franke, C.: Integration von Produkt- und Produktionsmodell mit Hilfe der Digitalen Fabrik. *wt Werkstatttechnik online* 91 (2001) 4, S. 214-220.

BLEY & BOSSMANN 2005

Bley, H.; Bossmann, M.: Standardisierte Produktmodelle für die automatisierte Montageplanung. *wt Werkstatttechnik online* 95 (2005) 9, S. 627-631.

BLEY ET AL. 2005

Bley, H.; Franke, C.; Zenner, C.: Variant Management in Production Planning. CIRP Journal of Manufacturing Systems 34 (2005) 1, S. 1-8.

BLEY ET AL. 2006

Bley, H.; Fritz, J.; Zenner, C.: Die zwei Seiten der Digitalen Fabrik. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 1/2, S. 19-23.

BLEY ET AL. 2004

Bley, H.; Reinhart, G.; Seliger, G.; Bernardi, M.; Korne, T.: Appropriate Human Involvement in Assembly and Disassembly. Annals of the CIRP 53 (2004) 2, S. 487-510.

BLUMBERG 1991

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

BOWLAND ET AL. 2002

Bowland, N. W.; Gao, J. X.; Sharma, R.: A product-configuration-driven system for assembly planning within a product data management environment. International Journal of Production Research 40 (2002) 9, S. 2041-2051.

BRACHT ET AL. 2005

Bracht, U.; Schlange, C.; Eckert, C.; Masurat, T.: Datenmanagement für die Digitale Fabrik. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 4, S. 197-204.

BULLINGER 1986

Bullinger, H.-J.: Systematische Montageplanung: Handbuch für die Praxis. München: Hanser 1986.

BULLINGER ET AL. 1989

Bullinger, H.-J.; Warschat, J.; Lay, K.: Künstliche Intelligenz in Konstruktion und Arbeitsplanung. Landsberg/Lech: Verlag Moderne Industrie 1989.

BURR ET AL. 2003

Burr, H.; Deubel, T.; Vielhaber, M.; Haasis, S.; Weber, C.: IT-Tools for Engineering and Production Planning in an International Automotive Company: Challenges and Concepts. 36th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems. Saarbrücken 03.-05. Juni 2003, S. 73-80.

CASE & HARUN 2000

Case, K.; Harun, W. A. W.: Feature based representation for manufacturing planning. International Journal of Production Research 38 (2000) 17, S. 4285-4300.

CONSTANTINESCU ET AL. 2006

Constantinescu, C.; Hummel, V.; Westkämper, E.: Fabrik Life Cycle Management. wt Werkstattstechnik 96 (2006) 4, S. 178-182.

CONSTANTINESCU ET AL. 2005

Constantinescu, C.; Heinkel, U.; le Blond, J.; Schreiber, S.; Mitschang, B.; Westkämper, E.: Flexible Integration of Layout Planning and Adaptive Assembly Systems in Digital Enterprises. 38th CIRP International Conference on Manufacturing Systems. Florianopolis 16.-18. Mai 2005.

CREMER 1992

Cremer, R.: Informationsmodellierung für die integrierte Arbeitsplanerstellung im Bereich der zerspanenden Fertigung. Diss. RWTH Aachen (1992). Aachen: Shaker 1992. (Berichte aus dem Werkzeugmaschinenlabor, Bd. 2).

CUIPER 2000

Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Diss. Technische Universität München (2000). München: Utz 2000. (Forschungsberichte *iwb* 143).

DANGELMEIER ET AL. 2002

Dangelmeier, S.; Hasselbring, W.; Koschel, A.; Tritsch, R.: Klassifikation von EAI-Systemen. In: Meinhardt, S. et al. (Hrsg.): Enterprise-Portale & Enterprise Application Integration. Heidelberg: Dpunkt 2002, S. 61-71. (HMD-Praxis der Wirtschaftsinformatik 225).

DAS & NAIK 2002

Das, S. K.; Naik, S.: Process planning for product disassembly. International Journal of Production Research 40 (2002) 6, S. 1335-1355.

DEUSE 1998

Deuse, J.: Fertigungsfamilienbildung mit feature-basierten Modellen. Diss. RWTH Aachen (1998). Aachen: Shaker 1998. (Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 98, 24).

DEUSE ET AL. 2006

Deuse, J.; Petzelt, D.; Sackermann, R.: Modellbildung im Industrial Engineering. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 1/2, S. 66-69.

DIN 199 2002

DIN 199: Technische Produktdokumentation - CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten - Teil 1: Begriffe. Berlin: Beuth 2002.

DIN 4000 1992

DIN 4000: Sachmerkmal-Leisten - Teil 1: Begriffe und Grundsätze. Berlin: Beuth 1992.

DIN 8593 2003

DIN 8593: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 1: Zusammensetzen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 2003.

DIN 66241 1979

DIN 66241: Informationsverarbeitung, Entscheidungstabelle, Beschreibungsmittel. Berlin: Beuth 1979.

DOMBROWSKI & TIEDEMANN 2004

Dombrowski, U.; Tiedemann, H.: Wissensmanagement in der Fabrikplanung. wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 4, S. 137-140.

DOMBROWSKI & TIEDEMANN 2005

Dombrowski, U.; Tiedemann, H.: Die richtigen Fabrikplanungswerkzeuge auswählen. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 100 (2005) 3, S. 136-140.

DRABOW & WOELK 2004

Drabow, G.; Woelk, P.-O.: Wandlungsfähige Fabrik der Zukunft. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 99 (2004) 3, S. 90-94.

DROBIR 2005

Drobir, T.: Prozessorientiertes Datenmanagement in der virtuellen Fabrik. Fachtagung Digitale Fabrik. Ludwigsburg 28.-29. Juni 2005.

EDER 2005

Eder, T.: Engineering Cooperation on OEM Level - Challenge for Collaborative Engineering Solutions. In: ProSTEP iViP Association (Hrsg.): ProSTEP iViP Science Days 2005. Böblingen: Kessler 2005, S. 104-115.

EHRENSPIEL 2006

Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 3. Aufl. München: Hanser 2006.

EIGNER & STELZER 2001

Eigner, M.; Stelzer, R.: Produktdatenmanagement-Systeme: Ein Leitfaden für Product Development und Life Cycle Management. Berlin: Springer 2001.

ELMARAGHY 1993

ElMaraghy, H. A.: Evolution and Future Perspectives of CAPP. Annals of the CIRP 42 (1993) 2, S. 739-751.

ENCOWAY 2005

encoway: Erfolgreich im Markt etabliert <http://www.encoway.de/uploads/media/timeGuide_05_1.pdf> - 23.04.2006.

ENG ET AL. 1999

Eng, T.-H.; Ling, Z.-K.; Olson, W.; McLean, C.: Feature-based assembly modeling and sequence generation. Computers & Industrial Engineering 36 (1999) 1, S. 17-33.

ESCH 1985

Esch, H.: Arbeitsplanerstellung für die Montage. Diss. RWTH Aachen (1985).

EVERSHEIM 2002

Eversheim, W.: Organisation in der Produktionstechnik 3: Arbeitsvorbereitung. 4. Aufl. Berlin: Springer 2002.

EVERSHEIM ET AL. 1996

Eversheim, W.; Maßberg, W.; Pritschow, G.; Tönshoff, H. K.: Prozeßgestaltung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management. Betriebshütte. 6. Aufl. Berlin: Springer 1996, S. 7/73-77/123.

EVERSHEIM & STEUDEL 1977

Eversheim, W.; Steudel, M.: Montagearbeitsplanerstellung für Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung mit Hilfe der EDV. Opladen: Westdeutscher Verlag 1977.

EVERSHEIM ET AL. 2002

Eversheim, W.; Fricker, I.; Hagemann, F.; Michalas, N.: Evaluation Method for Manufacturing Process Chains in Decentralized Production. Proceedings of the 1st CIRP (UK) Seminar on Digital Enterprise Technology Teil 2. University of Durham 16.-17. September 2002, S. 135-139.

FELDMANN 1997

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

FELTES & LÄMMER 2005

Feltes, M.; Lämmer, L.: PLM Services Standardization - A Leap forward in Product Data Communication. In: ProSTEP iViP Association (Hrsg.): ProSTEP iViP Science Days 2005. Böbingen: Kessler 2005, S. 28-39.

FIRCHAU ET AL. 2002

Firchau, N. L.; Franke, H.-J.; Huch, B.; Menge, M.: Variantenmanagement: Variantenvielfalt in Produkten und Prozessen erfolgreich beherrschen. In: Franke, H.-J. et al. (Hrsg.): Variantenmanagement in der Einzel- und Kleinserienfertigung. München: Hanser 2002, S. 1-25.

FLEISCHER ET AL. 2004

Fleischer, J.; Aurich, J. C.; Herm, M.; Stepping, A.; Köklü, K.: Verteilte kooperative Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik online* 94 (2004) 4, S. 107-110.

FRANKE 2003

Franke, C.: Feature-basierte Prozesskettenplanung in der Montage als Basis für die Integration von Simulationswerkzeugen in der Digitalen Fabrik. Diss. Universität des Saarlandes (2003). Saarbrücken: Lft 2003. (Schriftenreihe Produktionstechnik, Bd. 28).

FUSCH 2005

Fusch, T.: Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion. Diss. Technische Universität München (2004). München: Utz 2005. (Forschungsberichte *iwb* 188).

GAUSEMEIER ET AL. 2000

Gausemeier, J.; Lindemann, U.; Reinhart, G.; Wiendahl, H.-P.: Kooperatives Produktengineering: ein neues Selbstverständnis des ingenieurmäßigen Wirkens. Paderborn: Heinz-Nixdorf-Institut 2000. (HNI-Verlagsschriftenreihe Bd. 79).

GERKEN 2000

Gerken, H. A.: Management von Erfahrungen mit einem Assistenzsystem für die Arbeitsplanung. Diss. Universität Karlsruhe (TH) (2000). Karlsruhe: Holler-Druck 2000.

GERWALD & REITER 2005

Gerwald, T.; Reiter, R.: Digitale Fabrik am Beispiel der Prozesskette Karosseriebau. 2. Fachkongress Digitale Fabrik. Ludwigsburg 28.-29. Juni 2005.

GÖRZ 1995

Görz, G.: Einführung in die Künstliche Intelligenz. 2. Aufl. Bonn: Addison-Wesley 1995.

GÖSCHEL 2006

Göschel, B.: Innovationen - Der Treibstoff für die automobiler Zukunft. In: Hoffmann, H. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium Tagungsband. München: Utz 2006.

GOTTLOB ET AL. 1990

Gottlob, G.; Frühwirth, T.; Horn, W.: Expertensysteme. Wien: Springer 1990.

GÜNTER & KÜHN 1999

Günter, A.; Kühn, C.: Knowledge-Based Configuration - Survey and Future Directions. In: Puppe, F. (Hrsg.): XPS '99: Knowledge-based Systems. Berlin: Springer 1999.

GÜNTER ET AL. 1999

Günter, A.; Kreuz, I.; Kühn, C.: Kommerzielle Software-Werkzeuge für die Konfigurierung von technischen Systemen. Künstliche Intelligenz 99 (1999) 3, S. 61-65.

GÜNTHNER ET AL. 2006A

Günthner, W. A.; Wilke, M.; Zäh, M. F.; Rudolf, H.: Planung von Produktionsprozessen und Materialflusssteuerung. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006, S. 151-161.

GÜNTHNER ET AL. 2006B

Günthner, W. A.; Wilke, M.; Zäh, M. F.; Aull, F.; Rudolf, H.: Produktion individualisierter Produkte. In: Lindemann, U. et al. (Hrsg.): Individualisierte Produkte - Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin: Springer 2006, S. 63-88.

HAMELMANN 1995

Hamelmann, S.: Systementwicklung zur Automatisierung der Arbeitsplanung. Diss. Universität Hannover (1995). Düsseldorf: VDI Verlag 1995. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 195).

HANßEN & RIEGLER 2002

Hanßen, D. et al.: Studie Digitale Fabrik - Zentrales Innovationsthema in der Automobilindustrie <http://www.t-systems.de/coremedia/generator/www.t-systems.de/de/Home/Presse/PressemappenMessenEvents/property=blobContent/id=5378/Handout_Roland_Berger.pdf> - 15.12.2005.

HAROLD ET AL. 2005

Harold, E. R.; Means, W. S.; Udemadu, K.: XML in a Nutshell. 3. Aufl. Peking: O'Reilly 2005.

HARUTUNIAN ET AL. 1996

Harutunian, V.; Nordlund, M.; Tate, D.; Suh, N.: Decision Making and Software Tools for Product Development Based on Axiomatic Design Theory. Annals of the CIRP 45 (1996) 1, S. 135-139.

HILDEBRAND ET AL. 2004

Hildebrand, T.; Günther, U.; Mäding, K.; Müller, E.: Die Fabrik als Produkt: Neue Leitbilder für die Fabrikplanung. *wt Werkstattstechnik online* 94 (2004) 7/8, S. 355-362.

HINKELMANN 1995

Hinkelmann, K.: Transformation von Hornklauseel-Wissensbasen: Verarbeitung gleichen Wissens durch verschiedene Inferenzen. Diss. Technische Universität Kaiserslautern (1995). Sankt Augustin: Infix 1995. (Dissertationen zur künstlichen Intelligenz 81).

HIRSCHBACH 1978

Hirschbach, O.: Rechnerunterstützte Montageplanerstellung. Diss. Universität Stuttgart (1977). Mainz: Krausskopf 1978. (IPA Forschung und Praxis)

HUANG ET AL. 1997

Huang, S. H.; Zhang, H. C.; Oldham, W. J. B.: Tolerance analysis for setup planning: a graph theoretical approach. *International Journal of Production Research* 35 (1997) 4, S. 1107-1124.

ISO/IEC 19501 2005

ISO/IEC 19501: Informationstechnik - Offene verteilte Verarbeitung - Vereinheitlichte Modellierungssprache (UML) Version 1.4.2. Berlin: Beuth 2005.

JANITZA 2004

Janitza, D.: Der Kunde als Konstrukteur - Kundenintegration durch erweiterte CAD-Modelle. Diss. Technische Universität München (2004). Düsseldorf: VDI Verlag 2004. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 392).

JIANG & YAN 2003

Jiang, Z. H.; Yan, J. Q.: Research and development on constraint-based product family design and assembly simulation. *Journal of Materials Processing Technology* 139 (2003) 1-3, S. 257-262.

JONAS 2000

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

JOO ET AL. 1997

Joo, J.; Cho, H.; Yun, W.: Efficient feature-based process planning for sculptured pocket machining. *Computers & Industrial Engineering* 33 (1997) 3, S. 493-496.

KAPP ET AL. 2005A

Kapp, R.; le Blond, J.; Westkämper, E.: Fabrikstruktur und Logistik integriert planen. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 4, S. 191-196.

KAPP ET AL. 2005B

Kapp, R.; le Blond, J.; Löffler, B.; Westkämper, E.: Integrated Factory and Logistics Planning. In: Zaeh, M. F. et al. (Hrsg.): 1st International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2005). München: Utz 2005, S. 193-199.

KAYACAN ET AL. 1996

Kayacan, M. C.; Filiz, I. H.; Sönmez, A. I.; Baykasoglu, A.; Dereli, T.: OPPS-ROT: An optimised process planning system for rotational parts. *Computers in Industry* 32 (1996) 2, S. 181-195.

KEIJZER ET AL. 2006A

Keijzer, W.; Kreimeyer, M.; Schack, R.; Lindemann, U.; Zäh, M.: Isolierung versus Vernetzung – wie arbeitet die Branche zusammen? 3. Fachkongress Digitale Fabrik. Ludwigsburg 23.-24. Mai 2006.

KEIJZER ET AL. 2006B

Keijzer, W.; Kreimeyer, M.; Schack, R.; Lindemann, U.; Zäh, M.: Vernetzungsstrukturen in der Digitalen Fabrik. 1. Aufl. Dr. Hut: München 2006.

KESTEL 1995

Kestel, R.: Variantenvielfalt und Logistiksysteme: Ursachen, Auswirkungen, Lösungen. Diss. Universität Dortmund (1993). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1995. (Gabler Edition Wissenschaft)

KIM ET AL. 2001

Kim, S. Y.; Wang, E.; Roh, H. M.: Geometry-based machining precedence reasoning for feature-based process planning. *International Journal of Production Research* 39 (2001) 10, S. 2077-2103.

KLAUKE 2002

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

KÖHLER 1989

Köhler, F.: Montagearbeitsplanerstellung mit Expertensystemen. Köln: TÜV Rheinland 1989.

KOHLHASE 1996

Kohlhase, N.: Strukturieren und Beurteilen von Baukastensystemen. Strategien, Methoden, Instrumente. Diss. TH Darmstadt (1996). Düsseldorf: VDI Verlag 1996. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 1, Nr. 275).

KOHLHOFF 2005

Kohlhoff, S.: Produktentwicklung mit SAP in der Automobilindustrie. Bonn: Galileo Press 2005.

KOPNER 2002

Kopner, A.: Prozessmodellbasiertes Technologieplanungssystem für Autonome Produktionszellen. Diss. RWTH Aachen (2002). Aachen: Shaker 2002. (Berichte aus der Produktionstechnik Bd. 2002, 12).

KRAUSE ET AL. 2003

Krause, F.-L.; Hayka, H.; Pasewaldt, B.: Produktdatenbasierte Kooperation in der Produktentstehung. In: Adam, W. et al. (Hrsg.): Datenmodelle in der Produktion. Düsseldorf: VDI Verlag 2003, S. 52-78. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 2, Nr. 633).

KRAUSE ET AL. 2002

Krause, F.-L.; Baumann, R.; Böttge, U.; Jansen, H.; Kaufmann, U.; Ficiciyan, Y.: iViP - integrierte Virtuelle Produktentstehung. In: Krause, F.-L. (Hrsg.): Abschlussbericht Juli 2002 - Integrierte Virtuelle Produktentstehung. München: Hanser 2002, S. 9-13.

KURBEL 1992

Kurbel, K.: Entwicklung und Einsatz von Expertensystemen. 2. Aufl. Berlin: Springer 1992.

LAPERRIÈRE & ELMARAGHY 1996

Laperrière, L.; ElMaraghy, H.: GAPP: A Generative Assembly Process Planner. *Journal of Manufacturing Systems* 15 (1996) 4, S. 282-293.

LEE & KWON 1995

Lee, J. K.; Kwon, S. B.: ES*: An expert systems development planner using a constraint and rule-based approach. *Expert systems with applications* 9 (1995) 1, S. 3-14.

LEI ET AL. 2001

Lei, Y.; Peng, Y.; Ruan, X.: Applying case-based reasoning to cold forging process planning. *Journal of Materials Processing Technology* 112 (2001) 1, S. 12-16.

LI 2003

Li, J.: Die Beherrschung der Variantenvielfalt im Vertriebsprozess mit Hilfe des Variantenkonfigurators am Beispiel der Implementierung der "SAP-R/3-Variantenkonfiguration". Diss. Universität Mannheim (2003). <<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:bsz:180-madoc-733>> - 18.08.2006.

LINGNAU 1994

Lingnau, V.: Variantenmanagement: Produktionsplanung im Rahmen einer Produktdifferenzierungsstrategie. Diss. Universität Mannheim (1994). Berlin: Schmidt 1994. (Betriebswirtschaftliche Studien 58).

LU ET AL. 1997

Lu, W. F.; Liu, X. F.; Chang, H.-C.; Dong, L.: Feature-based Representation and Indexing of Axisymmetric Parts in Machining Process Planning using Case-Based Reasoning. In: ICTAI (Hrsg.): 9th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI '97). 1997, S. 406-413.

MACKE 2006

Macke, C.: Die „Digitale Fabrik“ als zentrale Integrationsplattform für Produkt - Prozess - Fabrik. 3. Fachkongress Digitale Fabrik. Ludwigsburg 23.-24. Mai 2006.

MACKRELL 2005A

MacKrell, J.: Rules-Driven Product Management
<http://www.cimdata.com/publications/article05-02_rules_driven_product_management.html> - 02.04.2006.

MACKRELL 2005B

MacKrell, J.: Rules-Driven Product Management: Part II
<http://www.cimdata.com/publications/article05-05_rules_driven_product_management_part_2.html> - 02.04.2006.

MÁRKUS ET AL. 2002

Márkus, A.; Vánca, J.; Kovács, A.: Constraint-based process planning in sheet metal bending. *Annals of the CIRP* 51 (2002) 1, S. 425-428.

MAROPOULOS ET AL. 2000

Maropoulos, P. G.; Yao, Z.; Bradley, H. D.; Paramor, K. Y. G.: An integrated design and planning environment for welding Part 1: Product modelling. *Journal of Materials Processing Technology* 107 (2000) 4, S. 3-8.

MEHNERT 2004

Mehnert, J.: Gestaltung und Integration von Arbeitsplanungskompetenzen für hierarchielose Produktionsnetze. Diss. Technische Universität Chemnitz (2004). <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2004/0149/data/Diss_Mehnert.pdf> - 18.08.2006.

MEIERLOHR 2003

Meierlohr, C.: Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung. Diss. Technische Universität München (2003). München: Utz 2003. (Forschungsberichte *iwb* 182).

MERTENS 1990

Mertens, P.: *Expertensysteme in der Produktion*. München: Oldenbourg 1990.

META GROUP 2004

META Group: METASpectrum evaluation: Enterprise Application Integration <<http://www.microsoft.com/technet/prodtechnol/biztalk/2004/evaluation/meta2004.aspx>> - 29.07.2006.

MINTERT 2002

Mintert, S.: XML & Co. München: Addison-Wesley 2002.

MÜHL 2002

Mühl, G.: Grundkonzept der iViP-Architektur. In: Krause, F.-L. (Hrsg.): Abschlußbericht Juli 2002 - Integrierte Virtuelle Produktentstehung. München: Hanser 2002, S. 52.

NEUDORFER 2005

Neudorfer, C.: Von 0 auf 100 in neun Monaten - Einführung von camos.CAPP bei Böhler Miller. camos Usermeeting 2005. Pforzheim 09.-10. November 2005.

NIELSEN ET AL. 2000

Nielsen, J.; Bernard, B.; Kjellberg, T.: Modeling and discrete-event simulation supporting conceptual design of manufacturing systems. Proceedings of the 33rd CIRP International Seminar on Manufacturing Systems. Stockholm 05.-07. Juni 2000, S. 331-334.

NOACK 2005

Noack, W.: XML: Version 1.1; Grundlagen. 4. Aufl. Hannover: Regionales Rechenzentrum für Niedersachsen 2005.

NÖTZKE 2002

Nötzke, D.: Methodische Unterstützung beim Abbilden strukturgebundener Baukastensysteme in elektronischen Produktkatalogen. Diss. TU Darmstadt (2001). Düsseldorf: VDI Verlag 2002. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 354).

NYHUIS ET AL. 2004

Nyhuis, P.; Elscher, A.; Kolakowski, M.: Prozessmodell der Synergetischen Fabrikplanung. wt Werkstatttechnik online 94 (2004) 4, S. 95-99.

OHL 2000

Ohl, S.: Prognose und Planung variantenreicher Produkte am Beispiel der Automobilindustrie. Diss. Universität Karlsruhe (2000). Düsseldorf: VDI Verlag 2000. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 16, Nr. 120).

OPITZ 1966

Opitz, H.: Werkstückbeschreibendes Klassifizierungssystem. Essen: Girardet 1966.

OPITZ 1971

Opitz, H.: Die richtige Sachnummer im Fertigungsbetrieb. Essen: Girardet 1971.

PATRON 2004

Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Diss. Technische Universität München (2004). München: Utz 2004. (Forschungsberichte *iwb* 190).

PORTER 1980

Porter, M. E.: Competitive strategy: Techniques for Analyzing Industries and Competitors. New York: Free Press 1980.

PULS 2003

Puls, C.: Die Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zum Management von Konfigurationswissen in KMU. Diss. ETH Zürich (2003). Düsseldorf: VDI Verlag 2003. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 16, Nr. 153).

PUPPE 1991

Puppe, F.: Einführung in Expertensysteme. 2. Aufl. Berlin: Springer 1991.

REFA 1992

REFA: Methodenlehre des Arbeitsstudiums: Teil 2 Datenermittlung. München: Hanser 1992.

REFA 1993

REFA: Ausgewählte Methoden der Planung und Steuerung. München: Hanser 1993. (Fachbuchreihe Betriebsorganisation)

REINHART 2003

Reinhart, G.: Mit der Digitalen Fabrik zur Virtuellen Produktion. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium: Grenzen überwinden - Wachstum der neuen Art. München: Utz 2003, S. 137-148.

REINHART ET AL. 1999

Virtuelle Produktion - Technologie für die Zukunft. VDI-Z Special C-Techniken 141 (1999) 5, S. 26-29.

RICHTER ET AL. 1974

Richter, E.; Schilling, W.; Weise, M.: Montage im Maschinenbau. Berlin: Verlag Technik 1974.

ROßGODERER 2002

Roßgoderer, U.: System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen. Diss. Technische Universität München (2002). München: Utz 2002. (Forschungsberichte *iwb* 168).

ROY ET AL. 1995

Roy, U.; Bharadwaj, B.; Chavan, A.; Mohan, C. K.: Development of a feature based expert manufacturing process planner. Proceedings of the 7th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence. 05.-08. November 1995, S. 63-70.

RUNTE 2006

Runte, W.: YACS: Ein hybrides Framework für Constraint-Solver zur Unterstützung wissensbasierter Konfigurierung <www.tzi.de/~woru/pub/diplom/runte06diplom.pdf> - 23.04.2006.

SAILER ET AL. 2004

Sailer, B.; Haasis, S.; van Houten, F.: Connection-based Information Management in Sales Processes and Order Processing. CIRP Journal of Manufacturing Systems 33 (2004) 6, S. 565-561.

SAP 2006

SAP AG: Beziehungswissen <http://help.sap.com/saphelp_dimp50/helpdata/DE/92/58c228417011d189ec0000e81ddfacc/content.htm> - 03.09.2006.

SAUER 2004

Sauer, O.: Einfluss der Digitalen Fabrik auf die Fabrikplanung. wt Werkstattstechnik online 94 (2004) 1/2, S. 31-34.

SCHMIDT 1996

Schmidt, B. C.: Integration von Arbeitsplanung und Fertigungssteuerung mit Netzarbeitsplänen. Diss. Universität Hannover (1996). Düsseldorf: VDI Verlag 1996. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 226).

SCHMIDT 2002

Schmidt, K.: Methodik zur integrierten Grobplanung von Abläufen und Strukturen mit digitalen Fabrikmodellen. Diss. RWTH Aachen (2002). <<http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=968925049>> - 04.06.2006.

SCHÖTTNER 1999

Schöttner, J.: Produktdatenmanagement in der Fertigungsindustrie. München, Wien: Hanser 1999.

SCHRAFT & KUHLMANN 2006

Schraft, R. D.; Kuhlmann, T.: Systematische Einführung der Digitalen Fabrik. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 1/2, S. 15-18.

SCHUH & SCHWENK 2001

Schuh, G.; Schwenk, U.: Produktkomplexität managen: Strategien - Methoden - Tools. 1. Aufl. München: Hanser 2001.

SCHULZ 1993

Schulz, C.: Ein Referenzmodell für die Entwicklung wissensbasierter Systeme zur Unterstützung der Arbeitsplanung. Diss. Universität Kaiserslautern (1993). (Produktionstechnische Berichte FBK, Bd. 8).

SFB336 1997

SFB336: Abschlussbericht des Sonderforschungsbereichs 336. München: 1997.

SOMASHEKAR 2002

Somashekar, R. S.: Fixturing features selection in feature-based systems. Computers in Industry 48 (2002) 2, S. 99-108.

STEINWASSER 1996

Steinwasser, P.: Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung. Diss. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (1996). Bamberg: Meisenbach 1996.

THALER 1993

Thaler, K.: Regelbasiertes Verfahren zur Montageablaufplanung in der Serienfertigung. Diss. Technische Universität Stuttgart (1993). Berlin: Springer 1993. (IPA-IAO Forschung und Praxis 176).

TROPSCHUH 1989

Tropschuh, P. F.: Rechnerunterstützung für das Projektieren mit Hilfe eines wissensbasierten Systems. Diss. Technische Universität München (1989). München: Hanser 1989. (KM Konstruktionstechnik München 1).

USHER 1999

Usher, J., M.; Fernandes, K. J.: An object oriented application of tool selection in dynamic process planning. *International Journal of Production Research* 37 (1999) 13, S. 2879-2894.

VAN HOUTEN 1991

van Houten, F. J. A. M.: PART: a computer aided process planning system. Diss. Universiteit Twente (1991). Enschede: 1991.

VDI-EKV 1992

VDI-EKV (Hrsg.): Wissensbasierte Systeme für Konstruktion und Arbeitsplanung. Düsseldorf: VDI Verlag 1992.

VDI-RICHTLINIE 2218 2003

VDI-Richtlinie 2218: Datenverarbeitung in der Konstruktion; Feature-Technologie. Berlin: Beuth 2003.

VDI-RICHTLINIE 2860 1990

VDI-Richtlinie 2860: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole. Berlin: Beuth 1990.

VDI-RICHTLINIE 4499 2006

VDI-Richtlinie 4499: Digitale Fabrik - Grundlagen, Blatt 1: Handlungsempfehlungen und Entscheidungshilfen. Berlin: Beuth 2006.

W3C 2006

W3C: Extensible Markup Language (XML)
<<http://www.w3.org/XML/>> - 07.05.2006.

WAGNER 2006A

Wagner, U.: Variantenmanagement durch prozessübergreifende Anwendung von Konfiguratoren. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): *Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement*. 1. Aufl. München: Utz 2006, S. 2/1-2/17. (*iwb* Seminarberichte 82).

WAGNER 2006B

Wagner, W.: *Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion*. Diss. Technische Universität München (2006). München: Utz 2006. (Forschungsberichte *iwb* 195).

WAGNER ET AL. 2003

Wagner, W.; Rudolf, H.; Zäh, M. F.: Minifabriken für die marktnahe Produktion individualisierter Produkte. 3. Chemnitzer Netztagung "Vernetzt planen und produzieren - VPP 2003". Chemnitz 22.-23. November 2003.

WALTER 2002

Walter, T. J.: Einsatz von Methoden der Digitalen Fabrik bei der Planung von Produktionssystemen für die Automobilindustrie. Diss. Technische Universität Clausthal (2002). Aachen: Shaker 2002. (Innovationen der Fabrikplanung und -organisation 6).

WEHLITZ 2000

Wehlitz, P. A.: Nutzenorientierte Einführung eines Produktdatenmanagement-Systems. Diss. Technische Universität München (2000). München: Utz 2000.

WESTKÄMPER 2005

Westkämper, E.: Integration einer "Smart Factory" in eine Echtzeit-Produktion <http://www.nexus.uni-stuttgart.de/i-kolloq05/presentation/praesentation_westkaemper.pdf> - 11.10.2005.

WESTKÄMPER & VON BRIEL 2001

Westkämper, E.; von Briel, R.: Continuous improvement and participative factory planning by computer systems. In: Annals of the CIRP 50; Nancy 19.-25. August 2001. 2001, S. 347-352.

WESTKÄMPER & WINKLER 2002

Westkämper, E.; Winkler, R.: Praxisbeispiel und Nutzen der objektorientierten Konzeption für die Fabriksimulation. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 3, S. 52-56.

WESTKÄMPER ET AL. 2003

Westkämper, E.; Bierschenk, S.; Kuhlmann, T.: Digitale Fabrik - nur was für große Unternehmen?. wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 1/2, S. 22-26.

WIENDAHL & HEUWING 1973

Wiendahl, H. P.; Heuwing, F. W.: Methode zur Klassifizierung von produktunabhängigen Baugruppen. Berlin: Beuth 1973. (Betriebs-technische Reihe)

WIENDAHL 2004

Wiendahl, H.-P.: Variantenbeherrschung in der Montage: Konzepte und Praxis der flexiblen Produktionsendstufe. Berlin: Springer 2004.

WIESMÜLLER 2002

Wiesmüller, J.: Digital Manufacturing (DMF) - Verschmelzung von Entwicklung und Produktion. Vortrag VDI-Arbeitskreise Produktionstechnik und Entwicklung, Konstruktion, Vertrieb. Donautal 12. März 2002.

YANG & LEE 1998

Yang, M. Y.; Lee, S. C.: A feature modification framework for the generation of alternative process plans. International Journal of Production Research 36 (1998) 7, S. 1825-1840.

YANG ET AL. 2001

Yang, N.-Y.; Parsaei, H. R.; Leep, H. R.: A prototype of a feature-based multiple alternative process planning system with scheduling verification. Computers & Industrial Engineering 39 (2001) 1/2, S. 109-124.

YIP-HOI & DUTTA 1995

Yip-Hoi, D.; Dutta, D.: Data extraction from geometric models for process planning for parallel machines. Journal of Manufacturing Systems 14 (1995) 5, S. 307-318.

ZAEH & RUDOLF 2003

Zaeh, M. F.; Rudolf, H.: Computer Aided Process Planning as an Enabler for Mass Customization: State of the Art and Future Areas for Research. Proceedings of the MCPC 03; 2nd Interdisciplinary World Congress on Mass Customization and Personalization. München 07.-08. Oktober 2003.

ZAEH & RUDOLF 2005A

Zaeh, M. F.; Rudolf, H.: Agile process planning based on the integration of process and factory planning. 38th CIRP International Conference on Manufacturing Systems. Florianopolis 16.-18. Mai 2005.

ZÄH & RUDOLF 2005B

Zäh, M. F.; Rudolf, H.: Prozessplanung zur marknahen Produktion. In: Müller, E. et al. (Hrsg.): Begleitband zu den Kolloquien des SFB 457 mit dem SFB 559 und dem SFB 582 am 20.04.2004 und 15.06.2004. Chemnitz: Eigenverlag 2005. (Wissenschaftliche Schriftenreihe des IBF Sonderheft 10).

ZÄH & SCHACK 2006

Zäh, M. F.; Schack, R.: Methodik zur Skalierung der Digitalen Fabrik. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 101 (2006) 1/2, S. 11-14.

ZÄH ET AL. 2006

Zäh, M. F.; Rimpau, C.; Wiedemann, M.; Wiesbeck, M.: Prozessgestaltung für die kundenindividuelle Auftragsabwicklung. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Produktionsmanagement - Herausforderung Variantenmanagement. 1. Aufl. München: Utz 2006, S. 1/1-1/22. (*iwb* Seminarberichte 82).

ZAHN 1999

Zahn, G.: Wissensbasiertes Datenmodell zur Integration von Konstruktion, Arbeitsplanerstellung und Spannplanung. Diss. Universität Hannover (1999). Düsseldorf: VDI Verlag 1999. (Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 20, Nr. 294).

ZHANG & ALTING 1994

Zhang, H.-C.; Alting, L.: Computerized manufacturing process planning systems. 1. Aufl. London: Chapman & Hall 1994.

ZHANG & ZHANG 1999

Zhang, D.; Zhang, H.-C.: A simulation study of an object-oriented integration test bed for process planning and production scheduling. The International Journal of Flexible Manufacturing Systems 11 (1999) 1, S. 19-35.

ZUBER ET AL. 2001

Zuber, E.; Kress, M.; Wagner, W.: Virtuelle Produktion - Partner der digitalen Produktentwicklung. wt Werkstattstechnik online 91 (2001) 6, S. 308-314.

9 Anhang

9.1 Genannte Firmen

Access Commerce GmbH

Maybachstr. 10
76227 Karlsruhe
<<http://www.access-commerce.com>>

Agile Software Corporation

6373 San Ignacio Ave.
San Jose, CA 95119-1200
USA
<<http://www.agile.com>>

Agile Software GmbH

Ruschgraben 133
76139 Karlsruhe

BMW AG

80788 München
<<http://www.bmw.de>>

camos Software und Beratung GmbH

Hasenbergstraße 31
70178 Stuttgart
<<http://www.camos.de>>

DaimlerChrysler AG

Epplestraße 225
70546 Stuttgart
<<http://www.daimlerchrysler.com>>

DELMIA World Headquarters

900 N. Squirrel Road, Suite 100
Auburn Hills, MI 48326
USA
<<http://www.delmia.com>>

DELMIA GmbH

Raiffeisenplatz 4
70736 Fellbach
<<http://www.delmia.de>>

encoway GmbH

Buschhöhe 2
28357 Bremen
<<http://www.encoway.de>>

Ford World Headquarters

1 American Rd
Dearborn, MI 48126
USA
<<http://www.ford.com>>

Ford-Werke GmbH

50742 Köln
<<http://www.ford.de>>

Gartner Group

56 Top Gallant Road
Stamford, CT 06902-7700
USA
<<http://www.gartner.com>>

General Motors Corporation

300 Renaissance Center
Detroit, MI 48265-3000
USA
<<http://www.gm.com>>

Honda Motor Co., Ltd.

Head Office: 2-1-1 Minami Aoyama
Minato-ku Tokyo 107-8556
Japan
<<http://www.honda.co.jp>>

Honda Motor Europe (North) GmbH

Sprendlinger Landstraße 166
63069 Offenbach
<<http://honda.de>>

Microsoft Corporation

One Microsoft Way
Redmond, WA 98052
USA
<<http://microsoft.com>>
OP&S Software GmbH

Steinriede 11
30827 Garbsen
<<http://www.ie-center.de>>

SAP Deutschland AG & Co. KG

Neurottstraße 15a
69190 Walldorf
<<http://www.sap.com>>

Sun Microsystems Headquarters

1601 Willow Rd
Menlo Park, CA 94025
USA
<<http://www.sun.com>>

UGS Global Headquarters

5800 Granite Parkway
Suite 600
Plano, TX 75024
USA
<<http://www.ugs.com>>

Toyota Motor Corporation

Head Office 1, Toyota-cho,
Toyota City, Aichi Prefecture 471-71
Japan
<<http://www.toyota.co.jp/index.html>>

Microsoft Deutschland GmbH

Konrad-Zuse-Straße 1
85716 Unterschleißheim
<<http://www.microsoft.de>>

Sun Microsystems GmbH

Sonnenallee 1
85551 Kirchheim-Heimstetten
<<http://www.de.sun.com>>

Unigraphics Solutions GmbH

Hohenstaufenring 48-54
50674 Köln
<<http://www.ugsplm.de>>

Toyota Deutschland GmbH

50420 Köln
<<http://www.toyota.de>>

Volkswagen AG

Berliner Ring 2
38436 Wolfsburg
<<http://www.volkswagen.de>>

9.2 Unified Modeling Language (UML)

Die Unified Modeling Language (UML) ist eine von der Object Management Group (OMG) entwickelte und standardisierte Sprache für die Modellierung von Software und anderen Systemen (ISO/IEC 19501 2005). Sie definiert Bezeichner für die meisten Begriffe, die für die Modellierung wichtig sind, und legt mögliche Beziehungen zwischen diesen Begriffen fest. Weiterhin legt sie grafische Notationen für Begriffe und Modelle von statischen Strukturen sowie von dynamischen Abläufen fest.

Sie beschreibt Klassenelemente mit ihren Beziehungen zu anderen Klassenelementen in Form von Blöcken und verschiedenen Verbindungslinien. Abbildung 72 zeigt beispielhaft Klassen in der UML-Notation. Die Projekte 0815 und 0816 sind jeweils Unterklassen von Projekt und erben von diesem Beziehungen, Merkmale und Methoden. Weiterhin bestehen zwischen den Klassen verschiedene Methodenaufrufe. Ein Element kann eine Multiplizität mit einer unteren und einer oberen Schranke zugeordnet sein. Ein Stern bedeutet hierbei, dass es keine obere Beschränkung gibt. In diesem Beispiel beinhaltet ein Projekt mindestens ein und höchstens unendlich viele Produkte. Ein Produkt wiederum kann keinem oder unendlich vielen Planungsprojekten zugeordnet sein.

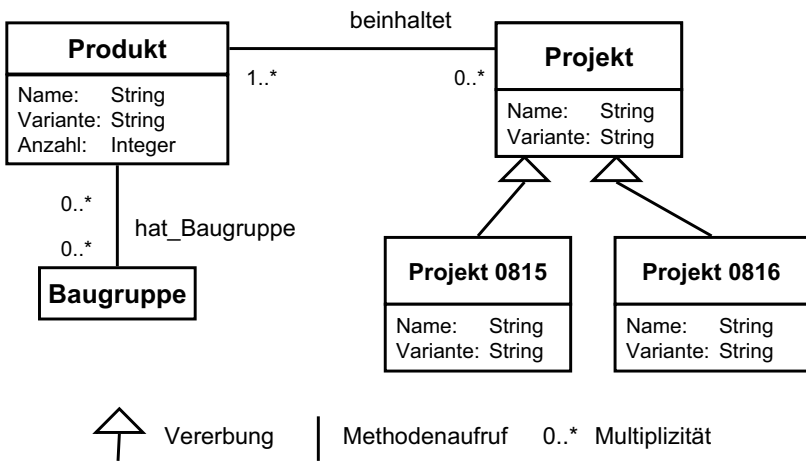


Abbildung 72: Beispielhafte Abbildung von Klassen in der Unified Modeling Language

9.3 Entity Relationship Diagram (ERD)

Das Entity Relationship Diagramm dient dazu, im Rahmen der Datenmodellierung einen Ausschnitt der realen Welt zu beschreiben. Es besteht in den meisten Fällen aus einer Grafik und einer Beschreibung der darin verwendeten Elemente. Die inhaltliche Bedeutung der Beziehung zwischen Entitäten kommt im ERD lediglich durch einen kurzen Text in der Raute (meistens ein Verb) bzw. als Beschriftung der Kante zum Ausdruck, wobei es dem Modellierer freigestellt ist, welche Bezeichnung er vergibt (siehe Abbildung 73).

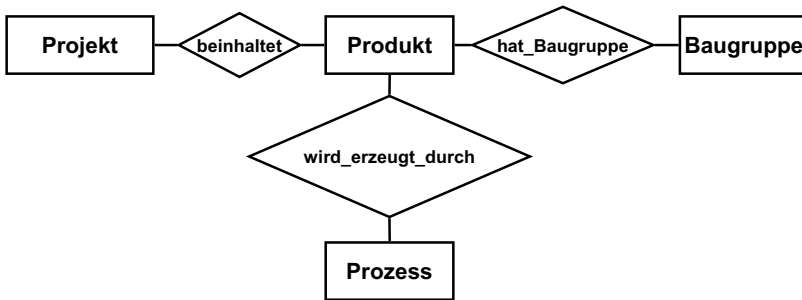


Abbildung 73: Beispiel eines Entity Relationship Diagramm

Die beiden Begriffe Entity und Relationship werden wie folgt charakterisiert:

- Gegenstand oder Entität (englisch Entity): Repräsentant für die Dinge (Objekte) der Wirklichkeit (z.B. Projekt, Produkt, Baugruppe, Prozess).
- Beziehung (englisch Relationship): semantischer Zusammenhang zwischen in der Regel zwei Gegenständen, z.B.
 - *beinhaltet* als Beziehung zwischen Projekt und Produkt
 - *hat_Baugruppe* als Beziehung zwischen Produkt und Baugruppe
 - *wird_erzeugt_durch* als Beziehung zwischen Produkt und Prozess

9.4 Extensible Markup Language (XML)

Die Extensible Markup Language (XML) (erweiterbare Auszeichnungssprache), ist ein Standard zur Erstellung maschinen- und menschenlesbarer Dokumente in Form einer Baumstruktur, der vom World Wide Web Consortium (W3C) festgelegt wurde. XML definiert dabei die Regeln für den Aufbau von Dokumenten. In Abbildung 74 ist der Inhalt einer XML-Datei beispielhaft visualisiert. Eine XML-Deklaration wird in Zeile 1 optional verwendet, um die XML-Version und die Zeichenkodierung zu spezifizieren.

Der logische Aufbau eines XML-Dokumentes ist ein hierarchisch strukturierter Baum. Als Baumknoten werden Elemente verwendet, die mittels eines passenden Paares aus Start-Tag (<Tag-Name>) und End-Tag (</Tag-Name>), z.B. in Zeile 4 und 12 für Projekt, gekennzeichnet werden. Weiterhin stellen Attribute als Schlüsselwort-Werte-Paare (Attribut-Name = "Attribut-Wert") Zusatzinformationen über Elemente bereit. So wird z.B. in Zeile 4 das Merkmal *ExternalID* definiert und mit einem Wert belegt. Weiterhin ist es möglich, Listenelemente zu erstellen. Dies wird in Abbildung 74 mit dem Element <item> in den Zeilen 8 bis 10 realisiert.

```
(1)  <?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
(2)  - <CamosDevelopInput>
(3)  - <Projekt>
(4)    - <Projekt ExternalId="PP-Planner7_12-52-8-148-251">
(5)      <Name>Projekt 0815</Name>
(6)      <Variante>Variantensatz Typ A</Variante>
(7)      <-Children>
(8)        <Item>PP-PLANNER751_16-49-8-10860-15770</Item>
(9)        <Item>PP-Planner7_12-52-8-148-253</Item>
(10)       <Item>PP-Planner7_12-52-8-148-255</Item>
(11)      </Children>
(12)    </ Projekt>
(13)  + <Verkaufsartikel ExternalId="PP-PLANNER751_16-12-33-10860-15859">
(14)  + <Baugruppe ExternalId="PP-Planner7_12-52-8-148-253">
(15)  + <Baugruppe ExternalId="PP-Planner7_12-52-8-148-255">
(16)  + <Baugruppe ExternalId="PP-PLANNER751_16-13-6-10860-15861">
(17)  </Produkte>
(18) + <Prozesse>
(19) + <Ressourcen>
(20) </CamosDevelopInput>
```

Abbildung 74: Beispiel einer XML-Datei

9.5 Genutzte Softwareprodukte

camos.Develop[®] (vormals *SECON*[®])

Entwicklungsumgebung für wissensbasierte Systeme
camos Software und Beratung GmbH
Hasenbergstraße 31
70178 Stuttgart
<<http://www.camos.de>>

camos.CAPP[®] (vormals *SECON*[®])

Wissensbasiertes System für die Arbeitsplanung
camos Software und Beratung GmbH
Hasenbergstraße 31
70178 Stuttgart
<<http://www.camos.de>>

em-Planner[®]

Prozessplanungswerkzeug der Digitalen Fabrik
UGS Global Headquarters (früher Tecnomatix GmbH)
5800 Granite Parkway
Plano, TX 75024
USA
<<http://www.ugs.com>>

Microsoft BizTalk Server[®]

Enterprise Application Integration-Software
Microsoft, Corp.
One Microsoft Way
Redmond, WA 98052
USA
<<http://www.microsoft.de>>

Deutsche Niederlassung:
Microsoft Deutschland GmbH
Konrad-Zuse-Straße 1
85716 Unterschleißheim

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 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 Industrierobotern
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, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bärstner, 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 *Wiba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, 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 *Pfrang, 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 Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens 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 *Schräfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wiesbacher, J.*
Methoden zur rationalen 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 Zustandesregelung 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 *Helmi, 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 Industrierobereinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetsteiner, 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 *Viethen, 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 Projektinformations- 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
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindt, 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 *Rath, 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 *Zwanzer, 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
Harzbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionssystemen**
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 *Deutsche, 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 *Geyer, 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 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Kähler, 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 Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte 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 von automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermeier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Präzeorientierte 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 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgleiteite Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

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@utz.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 Dichtungs montage 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 - Flexibel und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen**
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 **Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele**
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 **Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation**
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 Mechatronik · Strukturtypen 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 Kapselfür 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

Forschungsberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iw b ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Müßler, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbänden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
 2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
 2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
 2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
 2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
 2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
 2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
 2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
 2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
 2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
 2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
 2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
 2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
 2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
 2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
 2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
 2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
 2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
 2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fähner
Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weißberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgorderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenster Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitingner
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
 2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
 2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
 2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
 2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
 2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
 2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
 2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
 2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Härtl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
 2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
 2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
 2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
 2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
 2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
 2007 · 202 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
 2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1

