TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

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

Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung

Mathey Wiesbeck

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. Veit Stefan Senner

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Sabina Jeschke,
   Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Die Dissertation wurde am 03.09.2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 07.02.2014 angenommen.

Mathey Wiesbeck

Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung

Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 285

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2014

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

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2014

ISBN 978-3-8316-4369-1

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

Geleitwort der Herausgeber

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

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen. Ziel der Forschungsarbeiten des ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

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

Gunther Reinhart *Michael F. Zäh*

Vorwort

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

Mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und die großzügige Unterstützung meiner Arbeit gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts. Ich bedanke mich sehr herzlich bei Frau Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Sabina Jeschke, der Direktorin des Institutsclusters IMA/ZLW & IfU - Lehrstuhl für Informationsmanagement im Maschinenbau, Zentrum für Lern- und Wissensmanagement und An-Institut für Unternehmenskybernetik e.V. der RWTH Aachen University, für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Veit Senner, dem Leiter des Extraordinariats Sportgeräte und Materialien am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, bedanke ich mich herzlich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern sowie allen Studierenden, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben. Dabei möchte ich meinen früheren Diplomanden Frank Kübler hervorheben, dessen Arbeiten einen maßgeblichen Beitrag leisteten. Mein Dank geht an Dr. Sonja Stork, ehemalige Mitarbeiterin des Lehrstuhls für Allgemeine und Experimentelle Psychologie der Ludwig-Maximilians-Universität München, deren wissenschaftliche Unterstützung kritische Teile dieser Arbeit ermöglicht hat. Für die fachlichen Diskussionen und die kritische Durchsicht meiner Arbeit möchte ich mich besonders bei Dr.-Ing. Henning Rudolf und Dr.-Ing. Martin Ostgathe bedanken. Sabine Lazarski danke ich für die sprachliche Durchsicht meiner Arbeit.

Diese Arbeit konnte nur durch die Unterstützung meiner Eltern entstehen. Sie haben mir meine akademische Ausbildung und dadurch den Weg zur Promotion ermöglicht. Nicht zuletzt und in besonderem Maße danke ich Sonja Huber für Motivation, Geduld und fachliche Unterstützung. Ohne sie wäre ich in vielerlei Hinsicht nicht an dem Punkt, an welchem ich heute stehe.

München, im Februar 2014 *Mathey Wiesbeck*

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis ..... **I**

Abkürzungsverzeichnis ..... **V**

Formelverzeichnis ..... **VII**

1 Einleitung **1**

1.1 Ausgangssituation 1

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit 5

2 Begriffe und Grundlagen der Montageplanung **9**

2.1 Allgemeines 9

2.2 Begriffsbestimmung 9

2.3 Aufgaben und Ablauf der Montageplanung 12

2.4 Graphentheoretische Grundlagen 15

2.4.1 Einleitung 15

2.4.2 Definitionen 15

2.4.3 Traversierung von Graphen 18

2.5 Zwischenfazit 18

3 Stand der Erkenntnisse **21**

3.1 Allgemeines 21

3.2 Modellierung von Montageabläufen und -sequenzen 21

3.2.1 Allgemeines 21

3.2.2 Verfahren zur Abbildung von Montagesequenzen 24

3.2.3 Verfahren zur Abbildung von Produktzuständen 34

3.2.4 Komplexität von Fügevorgängen 39

3.2.5 Datenstrukturen der Digitalen Fabrik 46

3.3 Optimierung von Montageabläufen und -sequenzen 48

3.3.1 Allgemeines 48

3.3.2 Verfahren zur Ermittlung kürzester Wege in Graphen 49

3.3.3 Kürzeste Wege in Graphen mit anwendungsbezogener Modifikation 50

3.3.4 Zwischenfazit 51

3.4 Zusammenfassung und Ableitung von Handlungsfeldern 51

4 Anforderungsanalyse 55

4.1 Allgemeines 55

4.2 Informationstechnische Assistenz in der manuellen Montage 55

4.2.1 Grundlegender Bedarf der Informationsbereitstellung 55

4.2.2 Studie zur adaptiven und situationsorientierten Führung in der manuellen Montage 57

4.2.3 Arbeitswissenschaftliche Aspekte der Werkerunterstützung 66

4.3 Zieldimensionen 67

4.4 Anforderungsstruktur 68

4.5 Konzeptionelle Anforderungen 71

4.6 Technische Anforderungen 72

4.7 Benutzerorientierte Anforderungen 74

4.8 Zwischenfazit 76

5 Konzeption und Systementwurf 77

5.1 Allgemeines 77

5.2 Abbildung des Montageprozesses 78

5.2.1 Automobile Navigation als Analogie zur Werkerunterstützung in der manuellen Montage 78

5.2.2 Struktur und Elemente des Montageprozesses 79

5.2.3 Datenmodell 99

5.3 Mechanismen und Abläufe 105

5.3.1 Allgemeines 105

5.3.2 Ableitung der Graphenstruktur aus Montagevorranggraphen 105

5.3.3 Vorverarbeitung der Graphenstruktur 109

5.3.4 Bestimmung der situationsorientierten Montagesequenz 112

5.4 Zwischenfazit 114

6 Umsetzung und Validierung 115

6.1 Allgemeines 117

6.2 Systemgestaltung und Implementierung 118

6.2.1 Systemaufbau 118

6.2.2 Modul Eingabe 119

6.2.3 Modul Visualisierung 121

6.2.4 Modul Anweisungserzeugung 122

6.2.5 Modul Datenmodell und Stammdaten 125

6.2.6 Validierung des Online-Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Montagesequenz 126

6.3 Technische und wirtschaftliche Bewertung 129

6.3.1 Allgemeines 129

6.3.2 Nutzenpotenziale und Einschränkungen 129

6.3.3 Wirtschaftliche Bewertung 131

7 Zusammenfassung und Ausblick 133

8 Literaturverzeichnis 135

9 Anhang 159

9.1 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten 159

9.2 Unified Modeling Language (UML) 161

9.3 Extensible Markup Language (XML) 162

9.4 Radio Frequenz Identifikation (RFID) 163

9.5 Klassendiagramm des Demonstrators 164

9.6 Genutzte Softwareprodukte 166

Abkürzungsverzeichnis

Anm.	Anmerkung
BDE	Betriebsdatenerfassung
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CIM	Computer Integrated Manufacturing
d. h.	das heißt
DAG	zyklenfreie Digraphen (engl. *directed acyclic graphs*)
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft e. V.
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
e. V.	eingetragener Verein
EN	Europäische Norm
engl.	englisch
et al.	et alii
etc.	et cetera
ff.	folgende
i. d. R.	in der Regel
insb.	insbesondere
ISO	International Organization for Standardization
MTM	Methods of Time Measurement
OBDD	Ordered Binary Decision Diagram
PPS	Produktionsplanung und -steuerung
REFA	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e. V.

S.	Seite
sog.	sogenannte
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
SvZ	System(e) vorbestimmter Zeiten
u. a.	und andere
UML	Unified Modeling Language
usw.	und so weiter
VBA	Visual Basic for Applications
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e. V.
Verf.	Verfasser
vgl.	vergleiche
W3C	World Wide Web Consortium
XML	Extensible Markup Language
XSD	XML Schema Definition
XSLT	Extensible Style Language Transformation
z. B.	zum Beispiel
z. T.	zum Teil

Formelverzeichnis

A	-	Menge an Fügeverbindungen
a	-	Attributfunktion, welche die Charakteristik von Entitäten und Zusammenhängen hinsichtlich Verbindungsart und geometrischen Eigenschaften abbildet.
$a_{(i,i+1)}$	-	Anweisung zu einem Fügevorgang $o_{(i,i+1)}$
a_i	-	Fügeverbindung des relationalen Modells
C, C_i	-	Menge an Bindungen bzw. Kontakten
c_i	-	Bindung zweier Baugruppen in der Diamant-Graph-Darstellung
$d(o_{(i,i+1)})$	s	Komplexitätsmaß eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$
$d(p_i, p_j)$	-	Distanz zwischen Knoten p_i und Knoten p_j
$deg(p)$	-	Grad eines Knotens p
E	-	Kantenmenge eines Graphen
e	-	Kante eines Graphen
F	-	Menge an Kanten eines Netzes N
$F_i(\underline{x})$	-	logische Funktion, welche den Verbindungszustand der i-ten Verbindung beschreibt
$f(p_i, p_j)$	s	Schätzfunktion für die Distanz zwischen Knoten p_i und Knoten p_j
$f_k(o_{(i,i+1)})$	-	kognitiver Beanspruchungsfaktor eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$
G	-	gerichteter Graph aus Knotenmenge V und Kantenmenge E
G'	-	Teilgraph des Graphen G
$g(K)$	-	Gewichtungsfunktion auf Kantenmengen

$H_{Vorgang}(o_{(i,i+1)})$	-	Entropie eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$
i	-	Zählvariable
$I(a_{(i,i+1)})$	-	Informationsgehalt einer Anweisung $a_{(i,i+1)}$
$I(o_{(i,i+1)})$	-	Informationsgehalt eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$
j	-	Zählvariable
k	-	Zählvariable
K	-	Teilmenge der Menge an Kanten eines Graphen
l	-	Zählvariable
$L(w)$	-	Länge eines Pfads
L_B	-	Anzahl an binären Verbindungzuständen
L_D	-	Anzahl an Quadraten zur Abbildung eines stabilen Zustands in der Diamant-Graph-Darstellung
m	-	Zählvariable
m	-	Markierungsfunktion eines Netzes N
m_0	-	Startmarkierung eines Netzes N
n	-	Zählvariable
N	-	Petri-Netz-Modellierung eines Systems
$N(p)$	-	Nachbarschaft eines Knotens p
$O()$	-	Zeitkomplexität eines Algorithmus
$o_{(i,i+1)}$	-	Fügevorgang, welcher Zustand p_i in Zustand p_{i+1} überführt
$\bar{o}_{(i,i+1)}$	-	äquivalente Demontage zu dem Fügevorgang $o_{(i,i+1)}$
OD_k	-	Orientierungsgrad der Klasse k eines Montageprimitivs
$OS_{k,l}$	-	Ordnungszustand des Orientierungsgrads PD_k und des Positionierungsgrads OD_l eines Montageprimitivs

P	-	Menge an (individuellen) Bauteilen eines Produkts
$P(X = a_{(i,i+1)})$	-	Eintretenswahrscheinlichkeit einer Anweisung $a_{(i,i+1)}$
PD_l	-	Positionierungsgrad der Klasse l eines Montageprimitivs
p_i	-	Zustand (z. B. Produkt, Verbindung)
P_i	-	Menge an (individuellen) Bauteilen eines Produktzustands p_i
p_n	-	Zustand (z. B. Produkt, Verbindung)
$Post(p)$	-	Menge der Nachfolger eines Knotens p
$Post^*(p)$	-	Menge der von einem Knoten p erreichbaren Knoten
$Pre(p)$	-	Menge der Vorgänger eines Knotens p
$Pre^*(p)$	-	Menge der Knoten, von denen ein Knoten p erreicht werden kann
R	-	Menge an eineindeutigen Zusammenhängen zwischen Paaren und Entitäten
R^2	-	Bestimmtheitsmaß eines linearen Zusammenhangs
R_i	-	Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Paar und Entität des relationalen Modells
s	-	Startknoten eines (Teil-)Graphen
S	-	Menge der Stellen eines Netzes N
T	-	Menge an Transitionen eines Netzes N
$T(o_{(i,i+1)})$	s	Auswahlreaktionszeit eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$
$t_{SvZ}(o_{(i,i+1)})$	s	physisches Belastungselement eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$
$t_{w,seq}(W)$	s	wissensbasiertes Beanspruchungselement einer durch den Pfad W bestimmten Montagesequenz
$t_w(o_{(i,i+1)})$	s	wissensbasiertes Beanspruchungselement eines Füge-

		vorgangs $o_{(i,i+1)}$
V	-	Knotenmenge eines Graphen
v, w	-	allgemeiner Knoten eines Graphen
v_i, w_i	-	expliziter Knoten eines Graphen
v_{Werker}	-	Vertrautheit eines Werkers mit dem System/Produkt
W	-	Pfad auf einem Graphen
x_i, y_i	-	Boolesche Variable zur Belegung eines inneren Knotens in der OBDD-Darstellung
$\underline{x}_k$	-	Binärvektor (des Zustands k) in der Menge Θ_i, von welchem aus die i-te Verbindung hergestellt werden kann
x_l	-	Symbol, wenn die l-te Komponente von $\underline{x}_k$ wahr ist
$\overline{x_l}$	-	Symbol, wenn die l-te Komponente von $\underline{x}_k$ falsch ist
z	-	Zielknoten eines (Teil-)Graphen
γ_{kl}	-	Zustand der l-ten Komponente von $\underline{x}_k$
Θ	-	Zustandsmenge aus P
θ, θ_i	-	stabile Baugruppe aus V
Θ_0	-	Zustandsmenge aus P, welche den Startknoten bestimmt
Θ_i	-	Menge (der Binärvektoren), von der ausgehend die i-te Verbindung hergestellt werden kann
Θ_n	-	Zustandsmenge aus P, welche den Endknoten bestimmt
$\mathbb{R}+$	-	Menge der reellen, positiven Zahlen
$\mathbb{N}$	-	Menge der natürlichen Zahlen

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation

Die fortschreitende Globalisierung hat zur Folge, dass der deutsche Maschinenbau dem Druck einer wachsenden Anzahl an Mitbewerbern aus dem Ausland ausgesetzt ist. Die Kernkompetenzen deutscher Unternehmen sind dabei insbesondere kurze Reaktionszeiten bei gleichzeitig hoher Flexibilität in Bezug auf die Kundenanforderungen. Unter dem Einsatz modernster Technologien werden Produkte hoher Qualität hergestellt (LEIBINGER 2003). Dem Aspekt der Rationalisierung geschuldet wurde jedoch eine starke Reduzierung der Flexibilitäten in Kauf genommen. Hinsichtlich zunehmender Forderungen der Kunden nach Individualisierung stellt dies jedoch keine dauerhafte Lösung dar (GERST et al. 2006). Die eingesetzte Automatisierungstechnik im Bereich der Montage stößt angesichts der geringen Wiederholvorgänge somit an ihre wirtschaftlichen Grenzen (ZÄH et al. 2005a). Die in diesem Rahmen durch den Markt und die Kunden beeinflussten Faktoren wirken über die unternehmensinternen Anforderungen mittelbar auf den Montagebetrieb und den Werker[1] (siehe Abbildung 1).

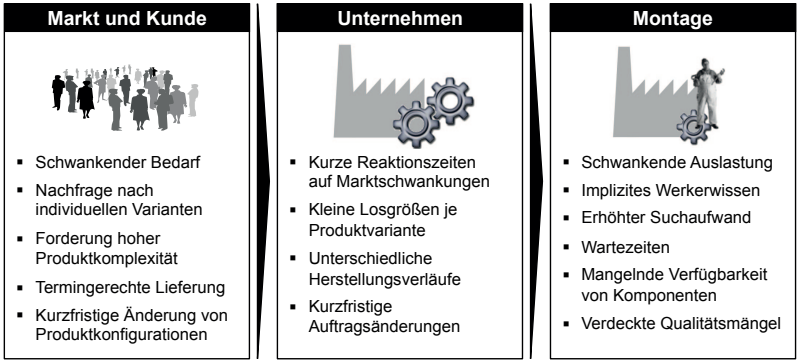


Abbildung 1: Einfluss des Marktes auf die Montage

[1] Aus Gründen der Lesbarkeit sind im Folgenden die männliche und die weibliche Sprachform nicht nebeneinander aufgeführt. Personenbezogene Aussagen, Amts-, Status-, Funktions- und Berufsbezeichnungen gelten stets für Frauen und für Männer.

Ausgehend von der ursprünglichen Problemstellung der Forderung nach Rationalisierung wurden vollautomatisierte Produktionssysteme ohne menschliche Arbeitskräfte lange Zeit als überzeugende Vision zukünftiger Produktionsstrukturen angesehen. Diese Konzepte sind für sich wiederholende Aufgaben, wie zum Beispiel in der Massenfertigung, sinnvoll. Es werden dabei jedoch die immensen kognitiven Fähigkeiten des Menschen zur Reaktion auf unvorhersehbare Ereignisse, zur Planung weiterer Schritte, zum Lernen, zum Sammeln von Erfahrungen und zur Kommunikation mit anderen außer Acht gelassen (SPUR 2003, SPATH et al. 2005b). Um ihre Wettbewerbsfähigkeit und somit ihre Existenz zu sichern, müssen sich Unternehmen durch die Wahl geeigneter Strategien an die veränderten Bedingungen des globalen Umfeldes anpassen (FELDMANN et al. 2004, ZÄH et al. 2005b). Die Konkurrenzfähigkeit der deutschen Betriebe hängt entscheidend von der Fähigkeit ab, „mit technologisch führenden Produkten und einer flexiblen und leistungsfähigen Produktion kundenindividuelle Produkte höchster Qualität herstellen zu können“ (SCHIRRMEISTER et al. 2003). Gerade diese komplexen, stark variantenreichen Produkte lassen sich trotz globaler Konkurrenz auch in Hochlohnländern wirtschaftlich fertigen (ZÄH et al. 2005b).

Eine der Hauptschwierigkeiten bei der Herstellung derartiger Produkte liegt in der komplexen Montage, welche unterschiedliche Arbeitsschritte für jedes Produkt notwendig macht. Der häufige Wechsel zwischen den zu montierenden Produktvarianten, ein frühes Abbrechen der Lernkurve der Monteure und eine hohe Komplexität der montagerelevanten Daten sind in diesem Zusammenhang kritisch zu sehen. HUNTER et al. (1990) stellen zusammenfassend dar, dass Unterschiede der individuellen Leistung von Produktionsmitarbeitern nicht zu vernachlässigen sind. Diese Aussagen werden durch weitere Studien gestützt (BUZACOTT 2002). Es werden vermehrt neue Medien zur Unterstützung von diesen Arbeitskräften eingesetzt (WIESBECK et al. 2006). Diese digitalen Assistenzsysteme entsprechen in ihren bisherigen Ausprägungen allerdings nicht den Anforderungen hinsichtlich Flexibilität, Adaptivität und Führungsbedarf des Werkers (vgl. Abbildung 2).

Eigenschaften und Merkmale (Werker)	Eigenschaften von Assistenzsystemen
▪ Individuelle Reihenfolge bei der Ausführung von (Füge-)Vorgängen ▪ Erlernen von Fähigkeiten und Aneignung von Erfahrungswissen ▪ Anfänger und sporadische Anwender ▪ Intuitive Handlungen in Abhängigkeit der Situation und des Kontextes	▪ Starre, festgelegte Abläufe und Dialoge ▪ Komplexe, systemorientierte Dialogstrukturen ▪ Orientierung an Durchschnittswerten ▪ Mangelnde Integration des Werkers, bedingt durch fehlende Abbildung im Prozess ▪ Beschränkte Integration des Montageumfelds

Abbildung 2: Gegenüberstellung der Eigenschaften und Merkmale des menschlichen Werkers und der Eigenschaften der digitalen Assistenzsysteme in der Montage in Anlehnung an SPATH & WEULE (1993)

Es herrscht ein grundsätzlicher Konsens in der Wirtschaft und der produktionstechnischen Wissenschaft, dass Deutschland als Industrie- und Produktionsstandort nur dann wettbewerbsfähig bleiben kann, wenn verstärkt auf die Kreativität, Flexibilität und Leistungsbereitschaft qualifizierter und motivierter Mitarbeiter als Träger für Innovationen gesetzt wird (SLAMA 2004, KRULL 2006, SANDERS 2006, HÜTHER & KOPPEL 2009). Die umfassende Nutzung dieser Potenziale bedingt jedoch Produktionsumgebungen, welche dem Mitarbeiter die entsprechende situationsorientierte Unterstützung bieten.

Die Reorganisation der Montage vieler Unternehmen hat häufig das Ziel, dezentrale, prozessorientierte und teilautonome Verantwortungsbereiche zu schaffen (KRINGS & LUCZAK 1997, SPATH et al. 2005a). Die Mitarbeiter der operativen Ebene stehen in diesen Organisationsstrukturen bei steigendem Variantenreichtum der zu fertigenden Produkte neuen Herausforderungen gegenüber. Neben der Ausführung elementarer und sich wiederholender Montagetätigkeiten müssen zusätzlich die variantenbildenden Montageoperationen und Aufgaben durch den einzelnen Mitarbeiter bewältigt werden. Ohne eine geeignete Unterstützung und ohne die kontinuierliche Weiterentwicklung und Verbesserung der eigenen Arbeitsabläufe kann keine nachhaltige Steigerung der Produktivität ausgelöst werden. Zunehmend werden unter diesem Gesichtspunkt die Partizipation des Mitarbeiters der operativen Ebene und seine Entscheidungsteilnahme in einem entsprechenden Verantwortungsbereich diskutiert. Dies bedeutet die Integration der Werker in den Montageprozess durch die Übergaben von Prozessverantwortung, die Einflussnahme auf den operativen Ablauf, benutzerfreundliche Mensch-Maschine-Schnittstellen, Maßnahmen zur mittelbaren und unmittelbaren Fehler-

vermeidung. Eine Qualitätssicherung sowie eine umfassende Information und Kommunikation sind zu berücksichtigen.

In der Produktion von Einzelteilen und Kleinserien tritt die im vorangegangenen Absatz skizzierte Situation in verstärkter Form auf. Sie ist durch eine Vielfalt an schwer formalisierbaren Einzeltätigkeiten und Einflüssen aus Planung und Fertigung geprägt. In Verbindung mit dem ständigen Wechsel dieser Einzeltätigkeiten, hervorgerufen durch die Forderung nach kundenindividuellen Produkten und Leistungen, folgt eine schwere Strukturierbarkeit und Planbarkeit von Montageabläufen. Der Informationsbedarf und somit die Notwendigkeit, den Mitarbeiter adäquat zu unterstützen, ist deutlich (BÖHL 2001, SLAMA 2004, ZÄH et al. 2007).

Die Erfüllung der Informationsbedarfe der Mitarbeiter besitzt eine wirtschaftliche Komponente. Diese wird zum einen durch die effiziente Führung durch den Prozess und zum anderen durch die Vermeidung von menschlichen Fehlern beeinflusst. Die Analyse von typischen Fehlern hat gezeigt, dass selten auftretende, variantenspezifische Arbeitsgänge fünf- bis sechsmal häufiger mangelhaft ausgeführt werden als Standardarbeitsgänge. Meist verursachen unerfahrene Mitarbeiter die Störungen (SLAMA 2004). Diese Unerfahrenheit ist sowohl auf eine unzureichende Qualifikation des Mitarbeiters als auch auf eine mangelnde Verfügbarkeit, Aktualität oder Vollständigkeit der Informationen zurückzuführen (KRÜGER et al. 1998). Fehlende Informationen über durchzuführende Tätigkeiten und eine unzureichende Klarheit über den Arbeitsablauf resultieren in psychischen Belastungen.

Das Problem liegt heute weniger in der Informationsbeschaffung, als mehr in ihrer Verdichtung, Auswahl und bedarfsgerechten Bereitstellung (LANG 2007). Es gilt, die Grundforderung der Arbeitsphysiologie, den arbeitenden Menschen nicht mit Informationen zu überlasten, zu beachten (MÜNZBERGER 2005). Diese Forderung ist in der europäischen Maschinenrichtlinie festgelegt und kann entsprechend für den Anwendungsbereich der manuellen Montage interpretiert werden (RICHTLINIE 2006/42/EG 2006). Informationsüberflutung, papiergebundene Anweisungen und die zeitaufwändige Suche nach Informationen haben zur Folge, dass Anleitungen und Dokumentationen nicht mehr gelesen werden. Der Mensch verlässt sich beim Wechsel von bekannten Produktvarianten zu neuen Ausprägungen eher auf seine Erfahrung und eigene Einschätzung der Situation (DREYER 2006).

Durch das situationsorientierte Bereitstellen von Arbeitsanweisungen und -abläufen kann ein auf der in dieser Arbeit beschriebenen Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung aufbauendes Assistenzsystem produktionstechnische Verbesserung unterstützen. Dabei werden Beiträge zur

- Reduzierung der qualifikations- und informationsbedingten Fehler, zur
- Verbesserung der Prozessfähigkeit und zur
- Steigerung der Produktivität der Mitarbeiter

geleistet. Schwerpunkt der Anwendbarkeit ist die Einzelplatzmontage und unter Einschränkungen die variantenreiche Montage von Kleinserien.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

Im Rahmen der mitarbeiterorientierten Produktion gilt es, den Mitarbeiter in seinem Streben nach Flexibilität und Effizienz zu fördern. Die Umsetzung und die Gestaltung des Zusammenwirkens von Mensch, Technik und Organisation ebenso wie die Erreichung eines wirkungsvollen Einsatzes der humanen Leistungsressourcen in Produktionsabläufen ist in diesem Sinne Ziel zukünftiger Produktionskonzepte (BRAUN & HAGENMEYER 2005). Der Beitrag der vorliegenden Arbeit, zugleich deren grundlegendes Ziel, ist die Entwicklung einer Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung in der Montage. Die Zielsetzung schließt die Konzeption entsprechender Ausprägungen der Implementierung ebenso ein, wie die Bestimmung von Optimierungsalgorithmen auf der entwickelten Struktur für den Betrieb. Mit der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen soll durch die Anpassung von Arbeitsanweisungen an den Menschen und die produktionstechnische Umwelt ein Beitrag geleistet werden, eine effiziente Werkerführung in der Montage von variantenreichen und komplexen Produkten zu gewährleisten. Hierdurch ist es möglich, dem qualifizierten Mitarbeiter die Freiräume zu bieten, die es ihm ermöglichen, seinen optimalen Grad der Leistungserbringung zu erreichen. Abbildung 3 zeigt die Vorgehensweise der vorliegenden Arbeit.

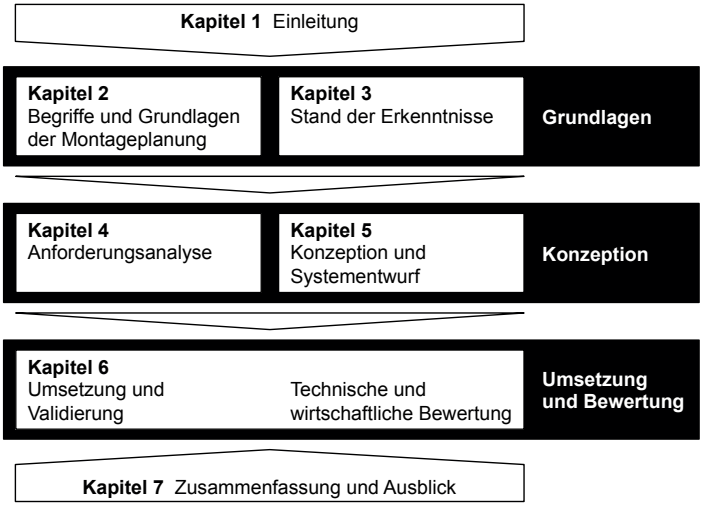


Abbildung 3: Gliederung der Arbeit

Das Kapitel 2 dient der Definition der begrifflichen Grundlagen und führt in die Montageplanung und die Graphentheorie ein. Hierzu werden die Grundlagen der Montageplanung vorgestellt und die elementaren Zusammenhänge der in der Arbeit angewandten Graphentheorie erläutert. In Kapitel 3 wird auf der Basis der in Kapitel 2 bestimmten Untersuchungsgebiete neben dem Stand der Erkenntnisse die Formalisierung von Montageabläufen und -sequenzen aufgezeigt. Aufbauend auf der Auswertung bestehender Ansätze in der wissenschaftlichen Literatur, werden die formalen Modelle im Hinblick auf ihre Anwendungen erläutert. Kapitel 3 endet mit der Zusammenfassung der aktuellen Defizite bekannter Formalisierungen von Montageabläufen.

In Kapitel 4 wird ermittelt, welche Anforderungen für den Einsatz von Formalismen zur situationsorientierten Montageassistenz gelten. Es werden die Ergebnisse einer durchgeführten Studie zur Gestaltung situationsorientierter Montageassistenz vorgestellt. Die davon abgeleiteten Anforderungen gliedern sich in konzeptionelle, technische und benutzerorientierte Aspekte. Darauf aufbauend erfolgen die Konzeption und der Systementwurf in Kapitel 5.

Die Umsetzung der Graphenstruktur in einem konzipierten Anwendungssystem wird in Kapitel 6 an Anwendungsbeispielen erprobt. Der letzte Abschnitt des

Kapitels widmet sich der technisch-wirtschaftlichen Bewertung des im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Ansatzes.

Im abschließenden Kapitel 7 erfolgt die Zusammenfassung der Erkenntnisse, auf deren Grundlage im Weiteren ein Ausblick auf weiterführende und zukünftige Forschungsaktivitäten vorgestellt wird.

2 Begriffe und Grundlagen der Montageplanung

2.1 Allgemeines

Das vorliegende Kapitel dient der Analyse und der Abgrenzung des betrachteten Anwendungsgebietes. Nach der Einführung der relevanten Begriffe werden die Rahmenbedingungen der manuellen Montage vorgestellt. Den Schwerpunkt des Kapitels bildet die Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Gestaltung und Planung der manuellen Montage. In Anlehnung daran werden die graphentheoretischen Grundlagen aufgezeigt, an welchen sich die entwickelte Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung orientiert.

Planung ist der Prozess des Festlegens von Zielen und des Formulierens von Methoden, Strategien und Vorgehensweisen, um diese zu erreichen. Der Begriff *Planung* kann sich sowohl auf die Langzeit- oder strategische Planung als auch auf die kurzfristige oder operative Planung beziehen. In diesem Sinne sind vor Beginn des Planungsprozesses dessen Ziele offen. Diese Offenheit impliziert auch das Hinterfragen bestehender Entscheidungsmuster in der Montageplanung unter der Beachtung sich ändernder Randbedingungen des Montageprozesses und kontextueller Einflussgrößen auf diesen. Die Notwendigkeit, bereits entwickelte Lösungen zu ändern oder zu verwerfen, wird sich bei Planungstätigkeiten nie völlig vermeiden lassen (FELDMANN et al. 2004).

2.2 Begriffsbestimmung

Aufgabe der *Montage* ist der „Zusammenbau von Teilen oder Gruppen zu Erzeugnissen oder zu Gruppen höherer Erzeugnisebenen“ (VDI 2860 1990). Alle Vorgänge, die notwendig sind, um ein in der Konstruktionsphase definiertes Produkt aus vorgegebenen Einzelteilen zusammenzubauen, gehören somit der Montage an. Im Herstellungsprozess stellt die Montage den letzten unmittelbar wertschöpfenden Schritt vor der Auslieferung an den Kunden dar.

Die *Arbeitsvorbereitung* umfasst alle Maßnahmen der methodischen Arbeitsplanung und Arbeitssteuerung mit dem Ziel, ein Optimum aus Aufwand und Arbeitsergebnis zu erreichen (ARNDT & BAUER 2007). Die *Arbeitsplanung* enthält alle einmalig auftretenden Planungsmaßnahmen, welche unter ständiger Berück-

sichtigung der Wirtschaftlichkeit die fertigungsgerechte Gestaltung eines Erzeugnisses oder die ablaufgerechte Gestaltung einer Dienstleistung sichern (REFA 1993a). Auf Basis von Produktspezifikationen wird im Aufgabenspektrum der Arbeitsplanung die Produktion zeit-, kosten- und qualitätsoptimal für die bestehenden Produktionsmittel geplant (EVERSHEIM 2002). Dabei fällt der Arbeitsplanung eine planende (Arbeitsablaufplanung) und gestaltende (Arbeitssystemplanung) Funktion zu (WESTKÄMPER et al. 2006). Die wirtschaftliche Fertigung und Montage sind Teil der Arbeitsablaufplanung, während die Arbeitssystemplanung die wirtschaftliche Auslegung und Gestaltung von Fertigung und Montage betrachtet (EVERSHEIM & SCHUH 2000).

Im Zusammenspiel mit der Fertigungs- und Materialplanung bildet die *Montageplanung* einen Teilbereich der Arbeitsplanung (EVERSHEIM 2002). Ausgehend von einem Montageproblem wird ein System bezüglich Ablauf und Anlage entworfen, welches es unter den gegebenen Bedingungen ermöglicht, Einzelteile oder Baugruppen zusammenzuführen (KONOLD & REGER 2003). Ziel der Montageplanung ist eine optimale Gestaltung der Abläufe und Anlagen bezüglich monetärer, zeitlicher, qualitativer und ergonomischer Merkmale (MOTUS 2009). Die Montageplanung ist von der *Montagesteuerung* abzugrenzen, zu deren Aufgaben das Reagieren auf kurzfristig auftretende Störungen gehört (THALER 1993). Ferner zählen die Analyse von Produkten und Anforderungen, die Grob- und Feinplanung des Montageablaufs und die Anordnung, Konfiguration und Detaillierung von Betriebsmitteln zu den Aufgaben der Montageplanung (GRUNWALD 2002).

REFA definiert den *Arbeitsplan* wie folgt: „Im Arbeitsplan sind die Ablaufabschnittfolge und die Arbeitssysteme beschrieben, die für eine schrittweise Aufgabendurchführung erforderlich sind. Darin ist auch die Vorgangsfolge zur Fertigung eines Teils, einer Gruppe oder eines Erzeugnisses beschrieben.“ (AWF & REFA 1973). Bezieht sich ein Arbeitsplan auf die Montage, so ist aus ihm zu entnehmen, in welcher Reihenfolge der Zusammenbau der Komponenten zu erfolgen hat (REFA 1993a).

Aufgabe der *Montageablaufplanung* ist es, festzulegen, wann welche Arbeitsvorgänge mit welchem Einzelteil oder welcher Baugruppe ausgeführt werden (GÖRZ 2003). Eine *Montagesequenz* wird als die Abfolge von Arbeitsvorgängen definiert, welche auf eine Menge an Einzelteilen und/oder Baugruppen zur Montage eines Teils, einer Gruppe oder eines Erzeugnisses angewandt wird. In den Bereich der Montageablaufplanung fällt ebenso die Erzeugung von *Montagevor-*

ranggraphen, welche die Relationen von Einzelteilen oder Baugruppen zueinander repräsentieren und gegebenenfalls über die Traversierung alternativer Pfade Wege zu einem vollständig montierten Produkt aufzeigen (JONES et al. 1998).

Arbeitsvorgänge (auch Arbeitsgänge) leiten sich aus dem Arbeitsplan ab und sind das Resultat von Verrichtungen der Potenzialfaktoren, die an Arbeitsobjekten vollzogen werden. Arbeitsverrichtungen der ausführenden Arbeitskräfte und Werkverrichtungen der Betriebsmittel führen in ihrer Kombination zu Arbeitsvorgängen an Objekten. Ein Arbeitsvorgang kann jeweils an einem Arbeitsplatz von einem Arbeiter oder einer Arbeitsgruppe zusammenhängend ausgeführt werden (EVERSHEIM & SCHUH 2000). Er kann weiter untergliedert werden. In der Einzel- und Kleinserienfertigung überwiegt (mit 68 %) die Aufgabengliederung in dieser Detaillierungsebene. Ein *Teilarbeitsvorgang* oder eine *Teilverrichtung* entspricht einer Fertigungsoperation, die in einer Aufspannung durchgeführt werden kann. Die Teilvorgangsebene wird (zu 89 %) in der Groß- und Massenmontage bevorzugt. Durch die detaillierte Beschreibung können angelernte Monteure eingesetzt werden und es kann auf hochqualifizierte Arbeiter verzichtet werden (AMMER 1985).

Die Gesamtheit der *Montagefunktionen* (auch *Montageoperationen*), die für die Erfüllung der Montageaufgabe notwendig sind, stellt den Montageablauf dar. Sie können in primäre und sekundäre Montagefunktionen unterschieden werden. *Primäre Montagefunktionen* beeinflussen den Montagefortschritt unmittelbar und bestimmen die Wertschöpfung. Das Fügen von Bauteilen zählt zu diesen Funktionen. *Sekundäre Montagefunktionen* tragen nicht direkt zum Montagefortschritt bei. Sie sind jedoch für dessen erfolgreiche Ausführung notwendig. Zu den sekundären Montagefunktionen werden z. B. das Kontrollieren und das Handhaben gezählt. Ziel einer wirtschaftlichen Montage ist die weitestgehende Reduktion der sekundären Montagefunktionen (LOTTER 1986).

Montageprimitive bezeichnen elementare Bewegungs- und Prozesselemente des Teilarbeitsvorgangs. Bewegungselemente sind dabei die vom Menschen ausgeführten Grundbewegungen, wie z. B. Teilen, Verbinden, Drehen und Detaillierungen dieser (ZÄPFEL 2001). Ein Montageprimitiv oder die Zusammenfassung mehrerer Montageprimitive bestimmt eine Montagefunktion. Montagefunktionen im Sinne der Fügeverfahren nach DIN 8593, Teil 1 können durch eine Auswahl von Montageprimitiven auf Basis der Richtlinie VDI 2860 interpretiert werden (ZÄH et al. 2007, ZAEH & WIESBECK 2008, ZÄH & WIESBECK 2008).

Die *Arbeitsanweisungen* unterscheiden sich von dem Arbeitsplan der Montage im Detaillierungsgrad. Sie beschreiben die auszuführende Arbeitstätigkeit im Detail und werden in der Montage beispielsweise zur Einarbeitung neuer Arbeitskräfte eingesetzt. Sie verbleiben in der Abteilung und können bei Bedarf wieder eingesehen werden (ESCH 1985).

Montageassistenzsysteme stellen eine Sonderform der *Werkerinformationssysteme* dar. Bezogen auf Produktionsaufgaben, sind Werkerinformationssysteme ein Synonym zum Begriff *Mitarbeiterinformationssysteme*. Mitarbeiterinformationssysteme verbinden Informationsmanagement und Wissensmanagement an menschen-orientierten Arbeitsplätzen. Sie sollen gewährleisten, dass Informationen dem Mitarbeiter zum richtigen Zeitpunkt, in der richtigen Form und in Assoziation zu seiner aktuellen Tätigkeit bereit gestellt werden (LANG 2007).

Nach der Dudenredaktion (2011) bedeutet eine *Situation* das Verhältnis oder die Umstände, in denen sich jemand (augenblicklich) befindet. Die Verbindung zwischen einer Person und ihrem Umfeld ist hierbei wesentlich. Insofern ist im Sinne der *situationsorientierten* Werkerführung nicht nur der Zustand des Montagesystems, sondern auch dessen Verhältnis zum Werker einzubeziehen.

2.3 Aufgaben und Ablauf der Montageplanung

Die komplexer werdenden Aufgabenstellungen der Montageplanung im variantenreichen Produktionsumfeld sind mit herkömmlichen Planungsmethoden und -werkzeugen kaum mit angemessener Effizienz zu lösen. Notwendig sind Methoden und Werkzeuge, welche die steigende Komplexität bewältigen und somit zur Steigerung der Planungsqualität und -produktivität beitragen (MIKSCH 1993). Die in diesem Zusammenhang nennenswerten Einflüsse auf die Montage und deren Planung, welche im Rahmen dieser Arbeit einbezogen werden, sind in Abbildung 4 dargestellt.

Einflussfaktoren auf die Planung	Interne Einflüsse auf die Montage
▪ Planungshilfsmittel ▪ Montagesystemkomponenten ▪ Leistungsfähigkeit der Handhabungsautomaten ▪ Steuerungs- und Regelungskonzepte ▪ Montagegerechte Produktgestaltung ▪ Prozesswissen zu Fügetechnologien	▪ Einflusselement Produkt ▪ Einflusselement Technologie ▪ Einflusselement Personal

Abbildung 4: Einflussfaktoren auf die Planung (MIKSCH 1993) und interne Einflüsse auf die Montage nach WILLNECKER (2001)

In der Literatur ist eine Anzahl an Planungsmethoden zu finden, welche die obigen Einflussfaktoren in allgemeiner oder spezifischer Weise in die Lösungsfindung einbezieht. Dabei können folgende Methoden für Planungsaufgaben im Bereich der überwiegend manuellen Montage als grundlegend angesehen werden:

- 6-Stufen-Methode nach REFA (1990)
- VDI-Richtlinien 2221 und 2222 (VDI 2221 1993, VDI 2222-1 1997)
- Methode nach BULLINGER (1993)
- Methode nach LOTTER (1986)
- Methode nach FELDMANN (1997)
- Methode nach GRUNWALD (2002)

PATRON (2005) bereitet in seiner Promotionsschrift eine Zusammenfassung der grundlegenden Arbeitsschritte und des prinzipiellen Vorgehens der Montageplanung auf (siehe Abbildung 5). Dabei ist zu beachten, dass die angegebenen Planungsphasen weder vollständig noch chronologisch bearbeitet werden müssen.

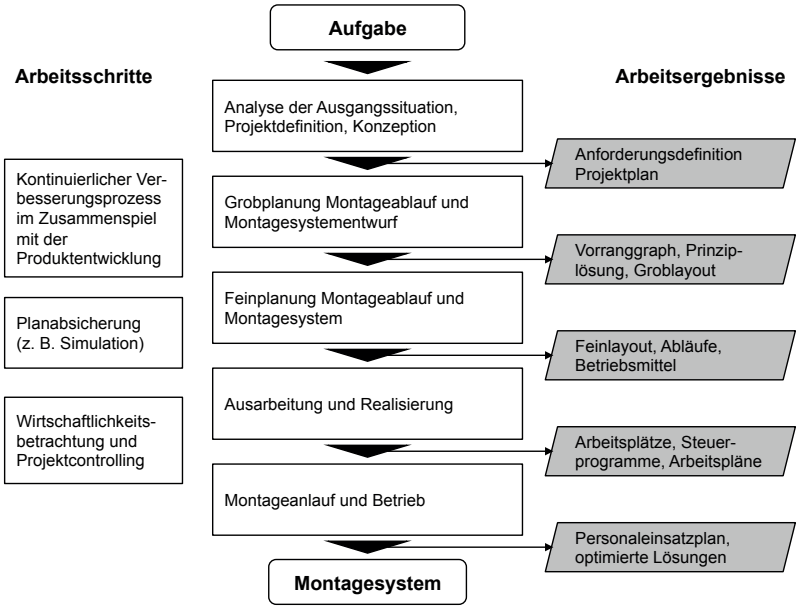


Abbildung 5: Vorgehen und Arbeitsschritte in der Montageplanung (Patron 2005)

In der Montageplanung werden zahlreiche Informationen verarbeitet und erzeugt. Diese Informationen müssen sinnvoll strukturiert werden, um sie automatisiert erfassen und verwalten zu können (FIRCHAU et al. 2002). Wichtige Dokumente hierfür sind die Stückliste, der Arbeitsplan und der Montagevorranggraph (RUDOLF 2007). Nach REFA (1993b) ist die Stückliste definiert als „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“. Dabei kann zwischen den folgenden Ausprägungen unterschieden werden (DIN 199-1 2002):

- Baukastenstückliste
- Strukturstückliste
- Gleichteileliste
- Mengenübersichtsstückliste
- Variantenstückliste

Der Arbeitsplan dokumentiert die Fertigungs- und Montageaufgabe in Folge von Arbeitsvorgängen (siehe auch Abschnitt 2.2, S. 9 ff.). Diese können parallel, sequenziell oder alternativ sein. Zu jeder Arbeitsfolge enthält er Informationen über das Erzeugnis und das Betriebsmittel am jeweiligen Arbeitsplatz. Zusätzlich ist auch die Reihenfolge der konkreten Arbeitsvorgänge mit den dazugehörigen Vorgabezeiten aufgeführt (EVERSHEIM 2002). Standardarbeitspläne sind Grundlage der Variantenplanung. Sie werden für eine ausgewählte Produktgruppe definiert und beinhalten die maximale Anzahl aller Arbeitsschritte für alle in dieser Gruppe zusammengefassten Produktvarianten. In der Praxis werden Standardarbeitspläne als Vorlage benutzt und durch Löschen oder Anpassen einzelner Arbeitsfolgen an die jeweilig Planungsaufgabe angeglichen (RUDOLF 2007).

2.4 Graphentheoretische Grundlagen

2.4.1 Einleitung

Gemeinhin stellt ein *Graph* eine Menge von Objekten zusammen mit einer Beziehung (Relation) auf diesen Objekten dar. Anschauliche Beispiele hierfür sind:

- Objekte: Personen; Beziehung: Person A kennt Person B oder
- Objekte: Städte; Beziehungen: es gibt eine direkte Autobahnverbindung zwischen Stadt A und Stadt B.

Der universelle Charakter der Graphentheorie ist in der Einfachheit der Strukturen begründet. Sie ist generell dann anwendbar, wenn in einem zu modellierenden System Paare von Objekten in einer Beziehung zueinander stehen können. Insbesondere sind Graphen eine hinreichende, oftmals notwendige Darstellungsform für die Zusammenhänge der Montage.

2.4.2 Definitionen

Ein *gerichteter Graph* $G = (V, E)$ (auch *Digraph* G) ist ein Tupel aus einer endlichen Knotenmenge V und einer Teilmenge E des kartesischen Produkts $V \times V$ ($E \subseteq V \times V$). Die Elemente aus E werden als *Kanten* bezeichnet. Jede Kante ist somit ein geordnetes Paar von *Knoten* (v, w). In einer möglichen Form der Visualisierung stellt man einen Graphen durch einen Punkt für jeden Knoten und einen Pfeil für eine Kante (v, w) von v nach w dar (Abbildung 6). Kanten werden

auch als ungeordnete Paare definiert, so dass für die Kanten keiner der Endknoten ausgezeichnet ist. In der Visualisierung werden Kanten dann als Linien zwischen den Endknoten dargestellt und man spricht von einem *ungerichteten Graphen* (Abbildung 6).

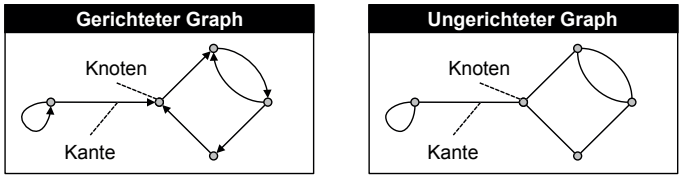


Abbildung 6: Visualisierung eines gerichteten und eines ungerichteten Graphen

Ist eine Gewichtsfunktion $g: E \rightarrow \mathbb{R}+$ gegeben, so wird das Tupel als *gewichteter Graph* bezeichnet. Für jede Menge $K \subseteq E$ sei

$$g(K) = \sum_{e \in K} g(e) \tag{1}$$

das Gesamtgewicht von K.

Ein *Pfad* W ist eine Folge von Knoten $W := v_1, v_2, ..., v_n$, so dass für $1 \leq i \leq n\text{-}1$ gilt: $(v_i, v_{i+1}) \in E$. Die *Länge* L des Pfads W ist die Anzahl der Kanten auf dem Pfad, also $L(W) = i\text{-}1$. Ein einzelner Knoten v stellt einen Pfad der Länge $L = 0$ dar und wird als *leerer Pfad* bezeichnet. Ein Pfad W heißt *einfach*, wenn alle Knoten auf dem Pfad paarweise verschieden sind. Dabei ist als Ausnahme $v_1 = v_n$ zugelassen. Ein Knoten v_j heißt von Knoten v_i *erreichbar* (in G), wenn es einen Pfad $W := v_1, v_2, ..., v_n$ in G gibt, so dass $v_1 = v_j$ und $v_n = v_i$.

Nachfolgermengen und *Vorgängermengen* bezeichnen Mengen von Knoten, welche bezogen auf einen Pfad in sequenzieller Relation zu einem Knoten v stehen. Dabei gilt

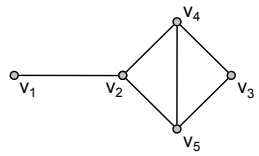
- $\text{Post}(v) = \{w \in V: (v, w) \in E\}$ bezeichnet die Menge aller (direkten) Nachfolger von v,
- $\text{Pre}(v) = \{w \in V: (w, v) \in E\} = \{w \in V: v \in \text{Post}(w)\}$ die Menge aller (direkten) Vorgänger von v,
- $\text{Post}^*(v) = \{w \in V$: w ist von v in G erreichbar$\}$ die Menge aller von v erreichbaren Knoten und

- Pre*(v) = $\{w \in V: v \in \text{Post*}(w)\}$ die Menge aller Knoten, die v erreichen können.

Ist $e = (v, w)$ eine Kante von G, dann nennt man die Knoten v und w zueinander *adjazent* oder *benachbart* und man nennt sie *inzident* zu e. Die Menge $N(v) = \{v \in V \mid (v, w) \in E\}$ der zu einem Knoten v benachbarten Knoten wird die *Nachbarschaft* von v genannt. Der *Grad* eines Knotens ist die Gesamtzahl der eingehenden und ausgehenden Kanten. Entsprechend werden Eingangsgrad bzw. vom Ausgangsgrad eines Knotens bezeichnet. Der Grad eines Knotens v wird durch $deg(v) = |N(v)|$ definiert. Die Anzahl der Knoten $|V|$ bestimmt die *Ordnung*, und die Anzahl der Kanten $|E|$ ergibt die *Größe* eines Graphen.

Nachfolgend sind die üblichen Darstellungen von Graphen abgebildet (Abbildung 7).

Zeichnung



Adjazenzmatrix

$$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

Adjazenzliste

(2),
(1, 4, 5),
(4, 5),
(2, 3, 4),
(2, 3, 4)

Inzidenzmatrix

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Abbildung 7: Übliche Darstellungen von Graphen am Beispiel eines Graphen mit fünf Knoten und sechs Kanten

Ein einfacher Pfad $W := v_1, ..., v_n$ in einem gerichteten Graphen, dessen Länge mindestens 1 (d. h. $n > 0$) ist und in dem der erste und der letzte Knoten identisch sind ($v_1 = v_n$), heißt *Zyklus*. Ein einfacher Pfad $W := v_1, v_2, ..., v_n$ in einem gerichteten Graphen, in dem der erste und der letzte Knoten identisch sind ($v_1 = v_n$) und jeder Knoten außer dem Start- und Endknoten genau einmal vorkommt, heißt *einfacher Zyklus*. Ein Zyklus ist ein Pfad $W := v_1, v_2, ..., v_m$, der sich aus einfachen Zyklen zusammensetzt. Jeder einfache Zyklus ist ein Zyklus. Ein Graph G heißt *azyklisch* (oder zyklenfrei bzw. kreisfrei), falls es keine Zyklen in G gibt.

Die Abkürzung DAG wird für „directed acyclic graphs“ (also zyklenfreie Digraphen) verwendet. Der Begriff der *Zyklenfreiheit einer Kantenmenge* $K \subseteq E$ bezeichnet die Zyklenfreiheit des Teilgraphen $G' = (V, K)$.

2.4.3 Traversierung von Graphen

Grundlage aller Operationen auf Graphen ist die systematische Suche nach Knoten und deren Relationen zueinander. Die *Traversierung* (aus spätlateinisch *transvertere* für umwenden) ist ein Sammelbegriff für Verfahren, die einen Pfad bestimmen, bei dem jeder Knoten und jede Kante eines Graphen genau einmal besucht werden. Hierbei sind zwei wesentliche Vorgehensweisen zu unterscheiden: Die Tiefensuche (engl. *depth-first-search*) und die Breitensuche (engl. *breadth-first-search*). Die Verfahren werden als sog. blinde Suchstrategien bezeichnet, da in der grundlegenden Ausprägung keine Informationen über den betreffenden Suchraum genutzt werden (GINSBERG 1993).

Nach dem Vorgehen der Tiefensuche werden von einem beliebigen Knoten aus alle erreichbaren Knoten identifiziert und markiert. Jeder erstmals markierte Knoten ist Ausgangspunkt einer weiteren Tiefensuche. Kann kein weiterer Knoten erreicht werden und sind noch nicht alle Knoten des Graphen markiert, so wird die Tiefensuche von einem noch nicht markierten Knoten erneut gestartet. Charakteristisch für diese Vorgehensweise ist, dass für jede Kante $k = (v, w_i)$ erst die Tiefensuche von w aus gestartet wird, bevor die nächste Kante $k' = (v, w_{i+1})$ untersucht wird.

Wird ein Algorithmus nach dem Vorgehen der Breitensuche angewandt, so werden alle mit dem leeren Pfad assoziierten Startknoten identifiziert und einer Liste hinzugefügt. Sequenziell werden nun diese Knoten überprüft und aus der Liste gelöscht. Wird der Zielknoten gefunden, dann bricht der Algorithmus ab. Andernfalls werden alle Knoten der Nachfolgemenge $\mathrm{Post}(v)$ des betrachteten Knotens v am Ende der Liste hinzugefügt. Charakteristisch für diese Vorgehensweise ist, dass ein Knoten $w \in \mathrm{Post}(v)$ erst betrachtet wird, wenn alle Knoten $v' \in \mathrm{Pre}^*(w)$ aus der Liste entfernt worden sind.

2.5 Zwischenfazit

In den vorangegangen Abschnitten wurden die Grundlagen und das notwendige Begriffsverständnis für diese Arbeit erläutert. Aus den Aufgaben und dem Ablauf

der Montageplanung resultieren Anforderungen hinsichtlich der Elemente einer wirtschaftlichen Montage und deren Planung. Die Elemente finden ihre Abbildung in graphentheoretischen Strukturen. Diese wiederum sind mit den Ansprüchen an ein ergonomisches Arbeitsumfeld in Einklang zu bringen ist, was durch eine integrierende Funktionalität der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung ermöglicht wird. Aufbauend auf den Grundlagen der Graphentheorie ist unter Beachtung der unterschiedlichen Aspekte des produktionstechnischen Kontextes eine effiziente und an ein Werkerinformationssystem angepasste Ausgabe und Interaktion möglich. Im anschließenden Kapitel 3 werden diesbezüglich die graphentheoretischen Anwendungen hinsichtlich Modellierung und Optimierung der Sequenzbestimmung erörtert.

3 Stand der Erkenntnisse

3.1 Allgemeines

In Anlehnung an die Phase „Grobplanung des Montageablaufs“ in der Montageplanung (siehe Abschnitt 2.3, S. 12 ff.) zeigt die Ablaufstruktur die logischen und zeitlichen Restriktionen der Montagefunktionen auf, welche zum Endprodukt führen. Die operative Montageplanung setzt dabei eine Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen voraus. Diese beschreibt den Prozess in seinen Ausprägungen hinreichend detailliert. Das Metamodell des Prozesses repräsentiert dabei die Struktur und wird in der folgenden Betrachtung des Stands der Erkenntnisse hinsichtlich Modellierung (Abschnitt 3.2) und Optimierung (Abschnitt 3.3, S. 48 ff.) erörtert.

3.2 Modellierung von Montageabläufen und -sequenzen

3.2.1 Allgemeines

Speicherung und visuelle Darstellung sind als Grundanforderungen an Verfahren zur Abbildung von Montagesequenzen zu richten. Bezüglich der Bewertung und der Auswahl von Verfahren zur Abbildung (und Ermittlung) von Montagesequenzen sind neben der notwendigen Datenmenge zur Speicherung der Struktur und dem Verständnis seitens des Anwenders folgende Aspekte relevant (SWAMINATHAN & BARBER 1996):

- Schwierigkeitsgrad der Ableitung der Abbildung aus der Beschreibung des zu montierenden Objektes;
- Automatisierbarkeit der Ableitung der Abbildung;
- Offenheit der Struktur hinsichtlich Umwandlung in andere Darstellungen;

Dem letzten Aspekt fällt eine gehobene Bedeutung zu, da dies eine Verwendung in der für eine bestimmte Anwendung effizientesten und passenden Form erlaubt.

Die Verfahren werden hinsichtlich der Charakteristik der Optimierung in globale oder lokale Verfahren unterschieden. Globale Verfahren ermöglichen die Ableitung von Montagesequenzen, welche die Optimalität in Bezug auf ein vorgege-

benes Kriterium oder vorgegebene Randbedingungen erfüllen (Tabelle 1). In diesem Rahmen modellierte BOURJAULT (1984) Produkte mit funktionalen Verknüpfungen der Verbindungszustände. Dabei wird anhand einer Folge von Fragen an einen oder mehrere Experten ein gerichteter Graph aus Verbindungszuständen (engl. *establishment condition representation*) ermittelt. Dieses Verfahren bildet die Grundlage für weitere Ansätze. Es wurde von DE FAZIO & WHITNEY (1987) so vereinfacht, dass durch die reduzierte Anzahl an Fragen auch komplexere Produkte betrachtet werden können. HENRIOUD & BOURJAULT (1988) verbesserten diesen Ansatz durch ein duales Vorgehen, basierend auf Baugruppen (auch Komponenten). HOMEM DE MELLO & SANDERSON (1990) schlugen eine Abbildung von Montagesequenzen durch UND/ODER-Graphen vor, welche in den Arbeiten von BALDWIN et al. (1991) aufgegriffen wurde. Dieses Verfahren erlaubt eine Sicht auf alle Montageoperationen des Produkts, was jedoch bei einer steigenden Anzahl von Komponenten unübersichtlich werden kann. Die Betrachtung von Produktfamilien in der Modellierung von Montageabläufen wurde von CAMPAGNE & FAVREL (1984) durch die Einführung der Konzepte der übergeordneten Sequenz (engl. *parent sequence*) und der Grundstückliste (engl. *parent bill of materials*) begründet. Weitere Ansätze zur Lösung der Problemstellung, welche aus der Betrachtung von Produktfamilien resultiert, wurden von STADZISZ & HENRIOUD (1995), ADAMOU et al. (1998) und DE LIT et al. (1999) vorgestellt. Lösungen, welche die Stückliste einbeziehen, sind Teil der Arbeiten von WORTMANN et al. (1997), SVENSSON (2001) und DU et al. (2005). Die Gestaltung von lokalen Verfahren nimmt bezüglich der Forderung nach Optimalität Abstriche zugunsten der kürzeren Suchzeiten auf der Darstellungsform der Montagesequenzen in Kauf. Somit ist es möglich, dass die ermittelten Lösungen nicht alle Sequenzen erfassen und mindereffiziente Montagesysteme beschreiben. Lokale Verfahren können anhand von vier Ansätzen klassifiziert werden:

- Generisch (BONNEVILLE et al. 1995, LEBKOWSKI 1997);
- Heuristisch (LAPERRIERE & ELMARAGHY 1992, MASCLE 1999);
- Strukturell (CHAKRABARTY & WOLTER 1997);
- Ausgleichend (HUANG & LEE 1991, MARTINEZ ET AL. 1995, SAWIK 1997);

Eine Übersicht der lokalen Verfahren und deren Beschreibung ist in Tabelle 2 veranschaulicht.

Tabelle 1: Globale Verfahren zur Abbildung von Montagesequenzen

Ansatz	Beschreibung	erfasste Sequenzen	Defizite
Verbindungen	▪ Ableitung von Montageplänen anhand des Verbindungsgraphen der Bauteile und anhand von Reihenfolgerestriktionen ▪ Planungsebene: Montageprimitiv	▪ Alle	▪ Exponentiell wachsende Struktur (Knoten) ▪ Hohe Anzahl an Fragen an Experten
Komponenten	▪ Ableitung von Montageplänen anhand der Dekomposition von Baugruppen/Zwischenstufen (auch Demontage) ▪ Planungsebene: Montagefunktion	▪ Alle	▪ Exponentiell wachsende Struktur (Knoten)
Produktfamilien	▪ Ableitung eines übergeordneten Planes der Baugruppen und zugeordneter Vorgänge, anschließende Erzeugung eines Planes für ein ausgewähltes Produkt ▪ Planungsebene: Produktähnlichkeit	▪ Alle	▪ Modellierung von Familien komplexer Produkte ▪ Erzeugung des Planes für ein ausgewähltes Produkt

Tabelle 2: Lokale Verfahren zur Abbildung von Montagesequenzen

Ansatz	Beschreibung	erfasste Sequenzen	Defizite
Generisch	▪ Bestimmung von „guten“ Sequenzen ausgehend von einer begrenzten Auswahl an Sequenzen (Population) nach einer Auswahlregel ▪ Planungsebene: Montagesequenz	▪ Auswahl	▪ Bestimmung der Population ▪ Ermittlung der Auswahlregel
Heuristisch	▪ Schrittweise (erweiternde) Auswahl um Montagefunktionen, welche vorgegebene Einschränkungen erfüllen ▪ Planungsebene: Montagefunktion	▪ Auswahl	▪ Bestimmung der Einschränkungen ▪ Auswahl anzuwendender Einschränkungen
Strukturell	▪ Inkrementelle Entwicklung einer übergeordneten Sequenz durch die Verschmelzung von Teilsequenzen ▪ Planungsebene: Produktstruktur	▪ Auswahl	▪ Modellierung der Produktstruktur ▪ Verschmelzungs-algorithmus ▪ Komplexität der Datenbank
Ausgleichend	▪ Auswahl von Montagefunktionen zur optimalen Nutzung der Hilfsmittel und Werkzeuge ▪ Planungsebene: Hilfsmittelnutzung	▪ Optimale Sequenz	▪ Modellierung des Montageprozesses ▪ Algorithmus und Komplexität der Datenbank

Im Folgenden werden ausgewählte Verfahren zur Darstellung im Hinblick auf die Problemstellung im Rahmen der Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung beschrieben. Hierzu ist in Abbildung 8 ein einfaches Beispielprodukt in einer Explosionsansicht visualisiert.

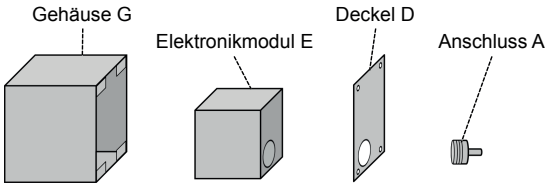


Abbildung 8: Baugruppe mit vier Bauteilen in Explosionsansicht

Abbildung 9 zeigt den zugehörigen Verbindungsgraphen (V, E). Dieses Produkt wird im Weiteren zur Erläuterung der Verfahren zur Abbildung von Montagesequenzen herangezogen. Bauart-bedingt besteht zwischen allen Bauteilen außer dem Gehäuse G und dem Anschluss A eine Verbindung.

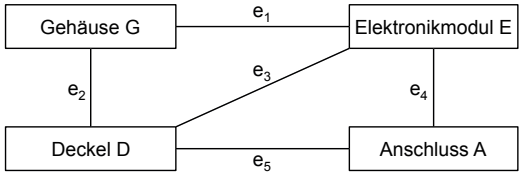


Abbildung 9: Verbindungsgraph (V, E) der Baugruppe in Abbildung 8

3.2.2 Verfahren zur Abbildung von Montagesequenzen

3.2.2.1 Allgemeiner Montagevorranggraph

In der Praxis haben sich Visualisierungen in Form von Vorranggraphen bewährt (PRENTING & BATTAGLIN 1964). Sie sind eine Repräsentation einer Ordnungsrelation auf der Menge der Montageschritte. In der Vorgangsknotendarstellung werden die Vorrangbeziehungen der Arbeitsvorgänge in netzplanähnlicher Struktur aus Knoten und Kanten abgebildet. Die Knoten bilden Teilaufgaben der Montage und die Kanten Abhängigkeitsbeziehungen als Verbindungslinie ab. Die Kanten verknüpfen den unmittelbar vorangehenden mit dem unmittelbar nachfolgenden Montageschritt. Auf diese Weise werden für Montageprozesse typischen UND-Verknüpfungen beschrieben. Die Teilaufgaben werden zum Zeitpunkt der frühestmöglichen Ausführbarkeit eingetragen. Das Ende der vom Knoten ausgehenden Kante entspricht dem spätesten möglichen Verrichtungszeitpunkt (BULLINGER 1993).

In einem Montagevorranggraphen können drei unterschiedliche Strukturen visualisiert werden (Abbildung 10).

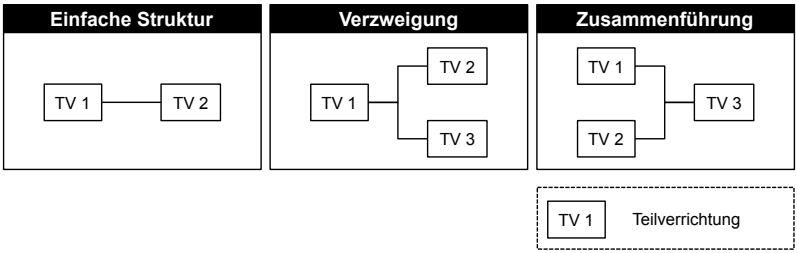


Abbildung 10: Strukturen zur Abbildung von Abfolgerestriktionen in Montagevorranggraphen (MUCKENHIRN 2005)

Die Abbildung eines Vorgangs in der einfachen Struktur legt fest, dass die Teilverrichtung *TV 2* nach der Teilverrichtung *TV 1* ausgeführt werden muss. Eine Abbildung in der Struktur mit Verzweigung besagt, dass die Teilverrichtungen *TV 2* und *TV 3* nach der Teilverrichtung *TV 1* ausgeführt werden müssen. Dabei besteht keine Restriktion bei der Ausführungsreihenfolge von *TV 2* und *TV 3 (Wahlfreiheit)*. Es können bei dieser Struktur formal eine unbegrenzte Anzahl folgender Verrichtungen nach der Teilverrichtung *TV 1* beschrieben werden. Eine Abbildung in der Struktur mit Zusammenführung veranschaulicht, dass die Teilverrichtungen *TV 1* und *TV 2* ohne Restriktion der Ausführungsreihenfolge bearbeitet werden können, jedoch die Teilverrichtung *TV 3* im Anschluss an die erfolgreiche Ausführung der Teilverrichtungen *TV 1* und *TV 2* ausgeführt werden muss. Auch hier ist die Anzahl der Teilverrichtungen vor Teilverrichtung TV3 nicht auf zwei begrenzt. Eine Abbildung von Montagevorgängen ohne Restriktion der Ausführungsreihenfolge erlaubt die Wahlfreiheit der Bearbeitung (BULLINGER 1993, MUCKENHIRN 2005).

Im Rahmen dieser grundlegenden Darstellung eines Montagevorgangs wird dieser durch einen einfachen Graphen $G = (V, E)$ repräsentiert. Dabei existiert für jedes Bauteil des zu montierenden Produkts genau ein Element in der Menge V. Ebenso existiert für jedes Bauteilpaar der Menge V, welches durch mindestens eine Oberfläche zu verbinden ist, genau ein Element der Menge E.

3.2.2.2 Gerichteter Graph nach Homem de Mello und Sanderson

HOMEM DE MELLO & SANDERSON (1991a) zeigen, dass, ausgehend von einer Darstellung wie in Abbildung 9, ein gerichteter Graph abgeleitet werden kann, welcher alle Sequenzen zur Montage eines Produkts enthält. Die Knoten V des Graphen symbolisieren stabile Zustandsmengen aus der Menge der Bauteile P. Dies sind Mengen Θ aus P, so dass $\theta \in \Theta$. θ ist eine stabile Baugruppe aus V. Die Kanten E repräsentieren geordnete Paare der Knoten. Für jede Kante gibt es nur zwei Teilmengen θ_i und θ_j in der Menge des ersten Knotens, welche nicht in der Menge des zweiten Knotens vorhanden sind. Ebenso existiert nur eine Teilmenge θ_k mit $\theta_k = \theta_i \cup \theta_j$ in der Menge des zweiten Knotens, welche nicht in der Menge des ersten Knotens ist. Des Weiteren ist die Montagefunktion, welche θ_i und θ_j verbindet, durchführbar (HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991a).

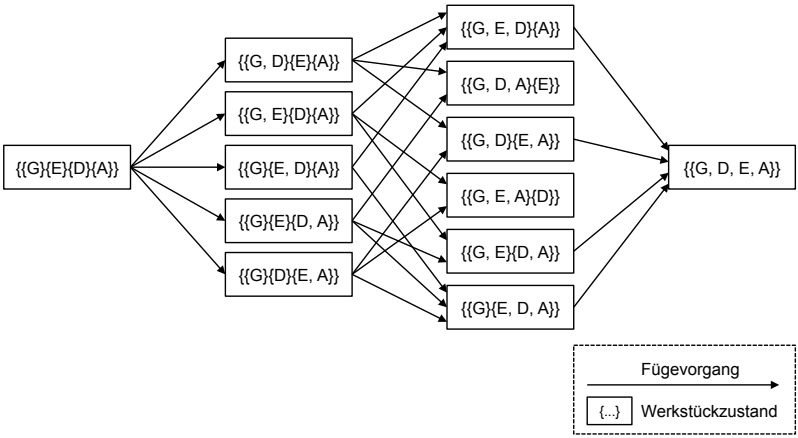


Abbildung 11: Gerichteter Graph der Montagesequenzen für die Baugruppe in Abbildung 8 (S. 24)

Ein Pfad von der Quelle zur Senke des Graphen entspricht einer zulässigen Montagesequenz. Dementsprechend steht in Abbildung 11 ein Pfad w von dem durch die Zustandsmenge Θ_0 bestimmten Startkonten {{G}{E}{D}{A}} zu dem durch die Zustandsmenge Θ_n bestimmten Endknoten {{G, D, E, A}} für eine durchführbare Sequenz zur Montage des Produkts dar. Für jeden Pfad gilt, dass jede Folge von Kanten einer Folge von Montageoperationen und jede Folge von Kno-

ten einer Folge von Produktzuständen des zu montierenden Produkts entspricht (HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991a).

3.2.2.3 Diamant-Graph-Darstellung nach De Fazio und Whitney

DE FAZIO & WHITNEY (1987) stellen unter der Bezeichnung Diamant-Graph-Darstellung aller durchführbaren Montagesequenzen (engl. *diamond graph representation of all feasible assembly sequences*) ein ähnliches Verfahren vor. Diese Abbildung der Montagesequenzen bezieht den Ausdruck *liaison* auf eine Bindung c_i zweier Baugruppen oder Bauteile. In der Symbolisierung wird ein stabiler Zustand des zu montierenden Produkts in Form eines Rechtecks als Zusammensetzung von L_D Quadraten abgebildet. Jedes Quadrat repräsentiert ein Element aus der Menge an Bindungen $C = \{c_1, c_2, ..., c_L\}$. Eine im Verlauf des Montageprozesses hergestellte Bindung wird durch ein gefülltes Quadrat und eine nicht hergestellte Bindung durch ein ungefülltes Quadrat visualisiert. Die Kanten, welche die Zustände verbinden, stellen Montagefunktionen zur Überführung der Zustände dar. Ein Pfad, ausgehend von dem Zustand mit ausschließlich ungefüllten Quadraten hin zu dem Zustand mit ausschließlich gefüllten Quadraten, entspricht einer durchführbaren Montagesequenz (SWAMINATHAN & BARBER 1996). Abbildung 12 zeigt den Diamant-Graphen, welcher alle durchführbaren Bindungssequenzen zur Montage des Produkts in Abbildung 8 (S. 24) enthält.

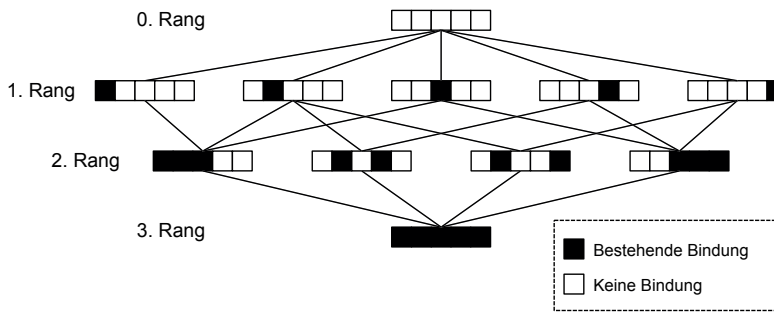


Abbildung 12: Darstellung möglicher Bindungssequenzen (engl. liaison sequences) für die Baugruppe in Abbildung 8 (S. 24)

Der Rang einer Ebene bezieht sich auf die möglichen Zustände nach der Herstellung der korrespondierenden Bindung(en). Somit repräsentiert der 0. Rang den

Ausgangszustand ohne hergestellte Bindungen, der 1. Rang entspricht allen möglichen Zuständen, nachdem genau eine Bindung erzeugt wurde.

3.2.2.4 UND/ODER-Graph

UND/ODER-Graphen (engl. *AND/OR graph*) erfüllen die Eigenschaften bipartiter Graphen, die zwei zueinander disjunkte Knotenmengen (Knotentypen) enthalten. Als bipartit gilt ein Graph genau dann, wenn keine Knoten gleichen Typs durch Kanten miteinander verbunden sind. Werden die UND- und die ODER-Operation jeweils einem eigenen Knotentyp zugeordnet, so resultiert daraus der UND/ODER-Graph, mit dem sich auch technologische Alternativen eines Montageprozesses abbilden lassen (HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1990). Die Knoten des UND/ODER-Graphen sind stabile Verbindungen. Die Hyperkanten, d. h. Kanten, welche jeweils durch eine nichtleere Teilmenge der Knotenmenge beschrieben werden, symbolisieren mögliche Montageoperationen.

HOMEM DE MELLO & SANDERSON (1991a) definieren Hyperkanten als geordnete Knotenpaare wie folgt:

- Das erste Element ist ein Knoten, welcher eine stabile Verbindung θ_k repräsentiert.
- Das zweite Element ist eine Knotenpaar $\{\theta_i, \theta_j\}$, so dass gilt: $\theta_k = \theta_i \cup \theta_j$.
- Es gibt eine Montagefunktion, welche θ_i mit θ_j vereint.

Ausgehend von einem UND/ODER-Graphen kann eine mögliche Montagesequenz (in diesem Fall ein möglicher Montagebaum) abgeleitet werden. Jeder Pfad auf dem UND/ODER-Graph, welcher die Menge der Bauteile $V = \{v_1, v_2, ..., v_n\}$ als Ausgangsknoten und die Mengen $\{v_1\}$, $\{v_2\}$, ... und $\{v_n\}$ als Endknoten besitzt, ist ein möglicher Montagebaum des zu montierenden Produkts. Jeder Montagebaum des UND/ODER-Graphen entspricht einer oder mehreren möglichen Montagesequenzen in der Visualisierung als gerichteter Graph (HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991a). In Abbildung 13 ist der UND/ODER-Graph der möglichen Montagesequenzen der Baugruppe in Abbildung 8 (S. 24) dargestellt.

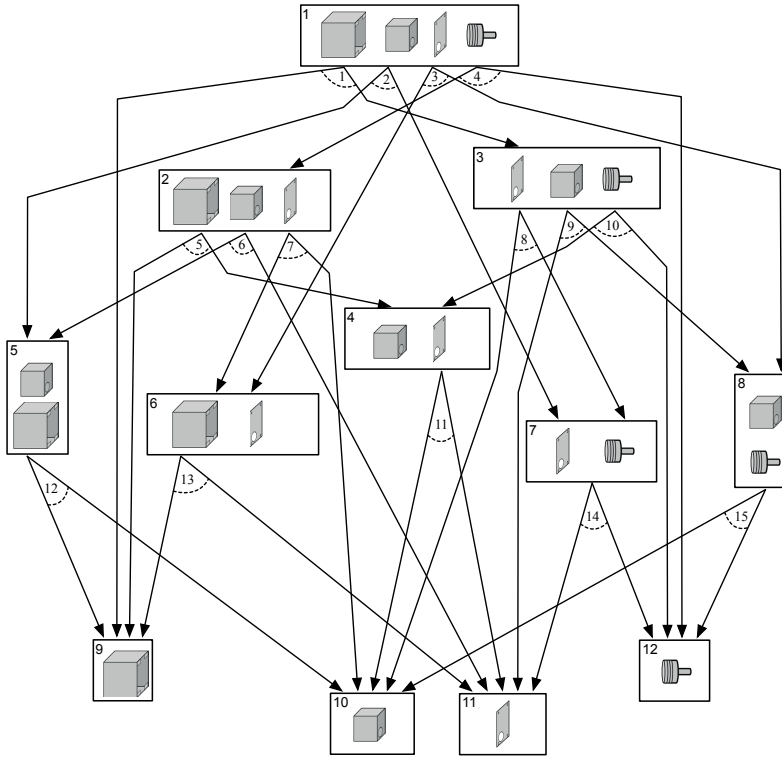


Abbildung 13: UND/ODER-Graph (engl. AND/OR graph) der möglichen Montagesequenzen der Baugruppe in Abbildung 8 (S. 24)

3.2.2.5 Petri-Netze

Petri-Netze sind ein klassischer, fundamentaler Formalismus zur Modellierung von Systemen mit verteiltem Zustand sowie parallelen und nichtdeterministischen Vorgängen. Petri-Netze sind bipartite, gerichtete Graphen aus zwei Klassen von Knoten, welche in Transitionen (aktive Knoten) und Stellen (passive Knoten) gliedert sind. Stellen repräsentieren den aktuellen Zustand des Systems. Übergänge zwischen den Systemzuständen werden durch Transitionen ausgelöst. Die gerichteten Kanten des Graphen verbinden eine Transition mit einer Stelle oder umgekehrt. (Knoten-)Markierungen repräsentieren den veränderlichen Zustand des modellierten Systems (PETRI 1962).

Das Petri-Netz N kann als gerichteter Graph $G = (S, T, F, m)$ mit der Markierungsfunktion $m : S \rightarrow \mathbb{N}$ veranschaulicht werden (Abbildung 14).

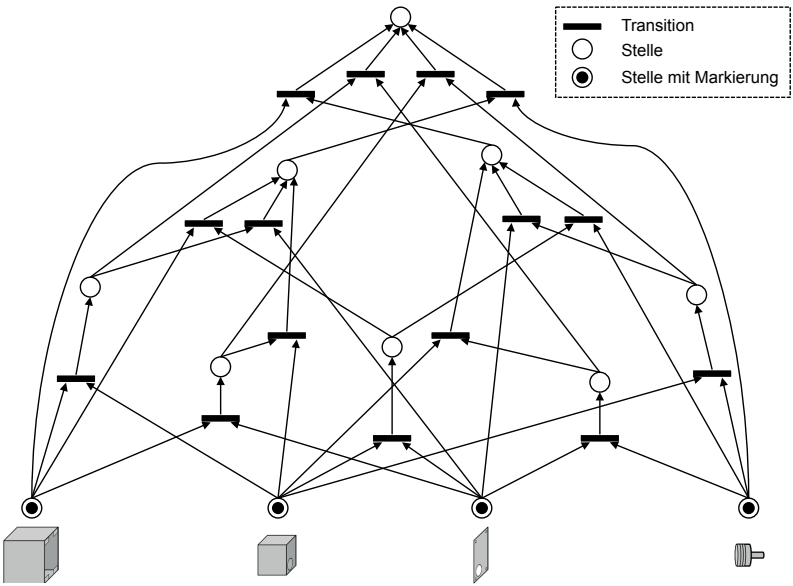


Abbildung 14: Graph des Petri-Netzes der möglichen Montagesequenzen der Baugruppe in Abbildung 8 (S. 24)

Formell ist ein Petri-Netz ein System $N = (S, T, F, m_0)$ mit:

- S: endliche Menge der Stellen (Zustände) des Netzes,
- T: endliche Menge der Transitionen (Übergänge) des Netzes,
- $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$ endliche Menge an Kanten,
- Startmarkierung m_0: $S \rightarrow \mathbb{N}$.

Petri-Netze können zur strukturell eindeutigen Repräsentation von Montageprozessen angewendet werden (ZHOU & JENG 1998, ROSELL 2004). Die Erweiterung der originären Definition hin zu zeitbewerteten Petri-Netzen erlaubt es, in einem Metamodell Montagezeiten abzubilden. Im Rahmen dieser Modellierung wird zwischen der Zeitbewertung der Marken, der Stellen, der Transitionen und der gerichteten Kanten (auch Bögen) unterschieden (STARKE 1990, 1995).

3.2.2.6 Verbindungszustand-Darstellung nach Bourjault

Die Abbildung von Montagesequenzen nach BOURJAULT (1984) geht aus den funktionalen Verknüpfungen der Verbindungszustände des zu montierenden Produkts hervor. Die Verbindungszustände werden durch L_B-dimensionale Binärvektoren repräsentiert, welche alle sinnvollen Montagesequenzen in logischen Ausdrücken symbolisieren. Sei $\Theta_i = \{\underline{x}_1, \underline{x}_2, ..., \underline{x}_{K_i}\}$ die Menge der Zustände, von welchen ausgehend die i-te Verbindung hergestellt werden kann, ohne die Montage des Produkts in der Gesamtheit zu verhindern. Der zu der i-ten Verbindung gehörende Verbindungzustand ist dann die logische Funktion (2):

$$F_i(\underline{x}) = F_i\left(x_1, x_2, \ldots, x_{L_D}\right) = \sum_{k=1}^{K} \prod_{i=1}^{L_B} \gamma_{kl} \tag{2}$$

Dabei entsprechen der Summen- und der Produktoperator den logischen Funktionen ODER, respektive UND. γ_{kl} ist das Symbol x_l, wenn die l-te Komponente von x_k wahr ist, oder das Symbol $\overline{x_l}$, wenn die l-te Komponente von x_k falsch ist. Die Verbindungszustände können aus dem gerichteten Graphen aller sinnvollen Montagesequenzen abgeleitet werden. Hierzu sind die Kanten inzident zu den Knoten zu betrachten, welche den Zuständen entsprechen, von denen aus die Montage erfolgreich ausgeführt werden kann. Die resultierenden Ausdrücke können durch Anwendung der Booleschen Algebra vereinfacht werden. Die Verbindungszustand-Darstellung ist in Abbildung 15 detailliert.

$$\begin{aligned}
F_1(\underline{x}) = {} & \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \\
& \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot x_5 + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \\
F_2(\underline{x}) = {} & \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \\
& \overline{x_3} \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot x_5 + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot x_4 \cdot x_5 \\
F_3(\underline{x}) = {} & \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \\
& \overline{x_3} \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot x_5 + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \\
& x_5 \\
F_4(\underline{x}) = {} & \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \\
& \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot x_5 + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot x_5 + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} \\
F_5(\underline{x}) = {} & \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + x_1 \cdot \overline{x_2} \cdot \overline{x_3} \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot \overline{x_2} \cdot \\
& \overline{x_3} \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} + \overline{x_1} \cdot x_2 \cdot \overline{x_3} \cdot x_4 \cdot \overline{x_5} + x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \overline{x_4} \cdot \overline{x_5}
\end{aligned}$$

Abbildung 15: Verbindungszustand-Darstellung der möglichen Montagesequenzen der Baugruppe in Abbildung 8 (S. 24)

3.2.2.7 Implizite Darstellung von Montagesequenzen

Die implizite Darstellungsform bietet keine unmittelbare Abbildung der Montagesequenz. Vielmehr werden Bedingungen definiert, welche durch die Zustände der Montagesequenz bzw. des Werkstücks erfüllt sein müssen (THOMAS et al. 1996). Typischerweise werden geordnete Entscheidungsgraphen (engl. *ordered binary decision diagrams (OBDD)*) oder Ausprägungen davon angewandt (ZHONG et al. 2006, GU & XU 2007).

Ein geordneter Entscheidungsgraph ist ein gerichteter, azyklischer Graph $G = (V, E)$ mit genau zwei Senken (auch Blätter), welche die Booleschen Funktionen 0 und 1 repräsentieren. Alle anderen Knoten im Graph werden als innere Knoten bezeichnet und mit einer Booleschen Variablen x_i (y_i) belegt. Jeder innere Knoten besitzt zwei ausgehende Kanten, die mit 0 (UND-Kante) bzw. mit 1 (ODER-Kante) bezeichnet werden. Dabei verweist die ausgehende UND-Kante auf einen Knoten, der die entsprechende Boolesche Funktion für $x_i = 0$ repräsentiert, und die ausgehende ODER-Kante auf einen Knoten, der die entsprechende Boolesche Funktion für $x_i = 1$ repräsentiert (siehe Abbildung 16).

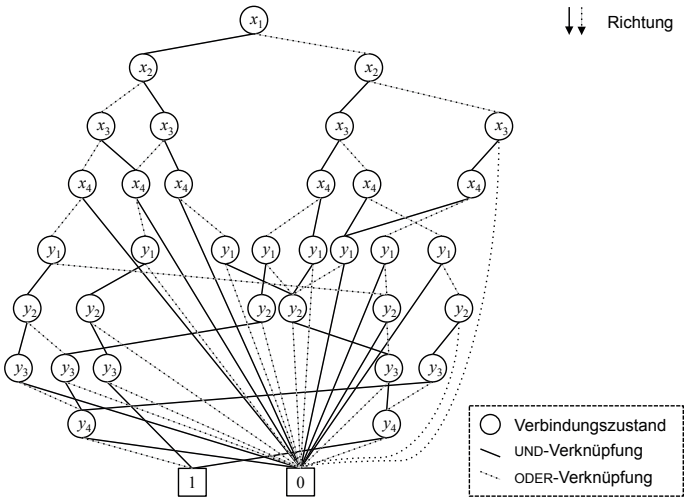


Abbildung 16: Implizite Darstellung der möglichen Montagesequenzen der Baugruppe in Abbildung 8 (S. 24) als OBDD

Der Entscheidungsgraph ist geordnet, d. h. auf jedem Weg in dem gerichteten Graphen ist die Reihenfolge der Variablen der besuchten Knoten identisch mit der Reihenfolge in der betrachteten Montagesequenz. In Anlehnung an HOMEM DE MELLO & SANDERSON (1991a) können zwei Verbindungszustände durch die Teilmengen θ_i und θ_j bestimmt werden. Eine Montagefunktion kann somit durch das geordnete Paar $(\{\theta_i, \theta_j\}, \theta_k)$ mit $\theta_k = \theta_i \cup \theta_j$ charakterisiert werden. Ist $(x_1, x_2, ..., x_n)$ der L_B-dimensionale Binärvektor des Verbindungszustands der Teilmenge θ_i und $(y_1, y_2, ..., y_n,)$ der L_B-dimensionale Binärvektor des Verbindungszustands der Teilmenge θ_k, so kann eine Montagefunktion durch den $2L_B$-dimensionalen Binärvektor $(x_1, x_2, ..., x_n, y_1, y_2, ..., y_n,)$ eindeutig beschrieben werden. Folglich ist der Zustand der Montagesequenz die Zusammensetzung der Verbindungszustände vor und nach einer Montagefunktion. Die Gültigkeit eines Zustands kann über einen vollständigen Pfad von der Quelle zu einer Senke nachgewiesen werden.

3.2.2.8 Zwischenfazit

Hinsichtlich der Modellierung von Montageabläufen unter der gegebenen Fragestellung ist aufgrund der möglichen exponentiellen Größe des Erreichbarkeitsgraphen eines Petri-Netzes in Abhängigkeit der Anzahl der Zustände eine algorithmische Anwendung in der Montageassistenz kritisch zu sehen. Die praktische Anwendbarkeit von UND/ODER-Graphen wurde dem gegenüber nachgewiesen (LAMBERT 2006). Die Ermittlung einer Sequenz von Montageoperationen auf deren Basis reduziert sich auf ein Suchproblem (vgl. Abschnitt 3.3, S. 48 ff.). Es konnte jedoch gezeigt werden, dass hierfür die Repräsentation der UND/ODER-Graphen nicht ausreichend ist, da bei der a-priori-Festlegung der Montagesequenzen keine Baum-, sondern eine Netzstruktur vorliegt (CAO & SANDERSON 1998).

Es kann festgehalten werden, dass die betrachteten Verfahren zur Abbildung von Montagesequenzen durch Umwandlung ineinander überführt werden können. Die Gleichwertigkeit der Repräsentationen wurde durch HOMEM DE MELLO & SANDERSON (1991a) nachgewiesen.

3.2.3 Verfahren zur Abbildung von Produktzuständen

3.2.3.1 Betrachtungsraum

Im Rahmen der Montage werden Bauteile und/oder -gruppen zu Einheiten höherer Ebenen verbunden (vgl. Abschnitt 2.2, S. 9 ff.). In diesem Sinne verändert sich der Produktzustand im Laufe der Montage vom Ausgangszustand (zerlegt) über Zustandsübergänge, ausgelöst durch Montageoperationen, zum Endzustand (zusammengebaut). Der im Montageprozess identifizierende Zustand kann somit durch die Zusammensetzung der Verbindungszustände vor und nach einer Montageoperation bestimmt werden. Unter Betrachtung der verfügbaren Technologien zur Identifikation des aktuellen Produktzustands bietet sich dieser als führendes Element in einer Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung an. Im Folgenden werden die aufgrund ihrer Anwendung und ihres Informationsgehalts als relevant betrachteten Verfahren zur Abbildung von Produktzuständen untersucht.

3.2.3.2 3D-CAD-Abbildung

CAD (engl. *Computer Aided Design*) bezeichnet die Repräsentation der abzubildenden Objekte durch ein virtuelles Modell. Die verschiedenen virtuellen Modelle werden anhand objektorientierter Datenbanken zusammengesetzt und können neben geometrierelevanten Angaben weitere Objektparameter beschreiben. Eine Auswahl standardisierter und implizit als Standard anerkannter Repräsentationen sind:

- IGES (engl. *Initial Graphics Exchange Specification*): Produktdaten können in Form von Schaltbildern, Drahtmodellen, Freiformflächen- oder Festkörpermodellen abgebildet werden. Die entsprechende IGES-Datei enthält ein CAD-Modell, welches sowohl die konstruktive Festkörpergeometrie (engl. *Constructive Solid Geometry (CSG)*) als auch die Abbildung durch begrenzende Oberflächen (engl. *Boundary Representation (b-rep)*) beinhalten kann (REED et al. 1990, BHANDARKAR et al. 2000).
- STEP (engl. *Standard for the Exchange of Product Model Data*): STEP wird für den Austausch von Daten zwischen CAD-Systemen verwendet. Das Modell enthält vielfältige Produktangaben. Diese gehen über die mechanische und die elektronische Gestaltung bis hin zu geometrischer Di-

mensionierung, Toleranzen, Analyse, Fertigung und spezifischen Zusatzdaten. Die Daten werden in der Modellierungssprache EXPRESS beschrieben. (SCHENCK & WILSON 1994, BHANDARKAR et al. 2000)

- VRML (engl. *Virtual Reality Modeling Language*): Ursprünglich für die Anwendung im World Wide Web entwickelt, können mit dieser Modellierungssprache neben der statischen Ausprägung 3-dimensionaler Szenen in Geometrie, Oberflächen, Transparenz usw. auch die Funktionalität und das dynamisches Verhalten beschrieben werden. Eine Mehrzahl der Softwarewerkzeuge zur 3D-Modellierung unterstützt den Import und den Export dieses Formates, was eine weite Verbreitung als Austauschformat mit sich bringt. Ein VRML-Modell bedient sich einer standardisierten Syntax und eines regulären Textformats (JEZERNIK & HREN 2003).

3.2.3.3 Abbildung als relationales Modell

Die Anwendung relationaler Modelle zur Abbildung von Produktzuständen in der Montageplanung wurde von HOMEM DE MELLO & SANDERSON (1991b) im Zuge der grundlegenden Arbeiten zu ihrem korrekten und vollständigen Algorithmus zur Erzeugung manueller Montagesequenzen begründet. Die vorangegangenen Arbeiten von Lieberman & Wesley (1977), Eastman (1981) sowie Lee & Gossard (1985) hatten einen starken Einfluss auf die Modellierungsstruktur.

Die Abbildung bedient sich drei Arten von Entitäten: (Bau-)Teile, Kontakte und Verbindungen. Ferner werden die Zusammenhänge zwischen den Entitäten beschrieben. Dabei können sowohl Entitäten als auch die Zusammenhänge durch Attribute erweitert werden.

Die formale Beschreibung eines relationalen Modells ist das Quintupel (P, C, A, R, a), für welches gilt:

- P ist die Menge an individuellen Bauteilen, die der zu modellierenden Baugruppe oder dem zu modellierenden Produkt entsprechen.
- C ist eine Menge an Kontakten, welche zu eineindeutigen Kontaktflächen von zwei Bauteilen der zu modellierenden Baugruppe oder des zu modellierenden Produkts korrespondiert. Zwei Bauteile können mehr als einen Kontakt besitzen.

- *A* ist eine Menge an Fügeverbindungen, welche die Verbindungsart zwischen den Elementen einer Menge an Kontakten visualisiert. Eine Fügeverbindung besitzt genau ein Bezugselement. Dieses kann der durch die Fügeverbindung hergestellte Kontakt, ein anderer Kontakt oder ein Bauteil sein.
- *R* ist eine Menge an eineindeutigen Zusammenhängen zwischen Paaren von Entitäten aus $P \cup C \cup A$.
- Die Menge der Attributfunktionen *a* beschreibt die Charakteristik von Entitäten und Zusammenhängen auf Teilmengen aus $P \cup C \cup A \cup R$ hinsichtlich der Verbindungsart, der Entitäten (welche durch Zusammenhänge verbunden sind) sowie der geometrischen Eigenschaften von Bauteilen.

Die in Abbildung 8 (S. 24) vorgestellte Baugruppe kann mit der Modellierung

- P = {Gehäuse, Elektronikmodul, Anschluss, Deckel}
- C = $\{c_1, c_2, \ldots, c_5\}$,
- A = $\{A_1, A_2, A_3\}$,
- R = $\{R_1, R_2, \ldots, R_{16}\}$ und
- entsprechenden *a*-Funktionen: C → {„Einpassen“, „Einschrauben“, …}

als relationales Modell veranschaulicht werden (vgl. Abbildung 17).

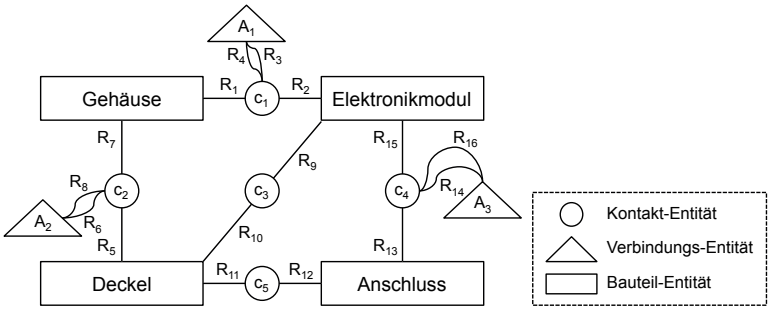


Abbildung 17: Relationales Modell der Baugruppe in Abbildung 8 (S. 24)

Eine dem relationalen Modell verwandte Abbildungsform sind Bindungsgraphen mit Zuordnung (engl. *attributed liaison graphs*), deren Bestandteile durch Objektattribute erweitert werden können. Ähnlich dem relationalen Modell gehören hierzu die Bauteilgeometrie und -position, die Verbindungsarten und Kontaktflächen sowie die physikalischen Eigenschaften (CHEN 1989, LEE & SHIN 1990, LEE 1992). Weitere Anwendungen von relationalen Graphen mit Zuordnung sind bei CORDELLA et al. (2000) und CHEN et al. (2004) zur Abbildung von Baugruppen zur Identifikation von Bestandteilen von CAD-Modellen zu finden.

3.2.3.4 Abbildung durch Binärvektoren

Die Darstellung eines Produktzustands als Binärvektor geschieht durch die Konfiguration eines L_B-dimensionalen Binärvektors. Das Symbol x_l erhält den Wert WAHR (bzw. 1 oder T), wenn die l-te Verbindung hergestellt ist. Respektive wird das Symbol x_l mit dem Wert FALSCH (bzw. 0 oder F) belegt, wenn die l-te Verbindung (noch) nicht besteht. Dieses Verfahren zur Abbildung von Produktzuständen enthält keine Informationen hinsichtlich der Art der Verbindungen. Es wird angenommen, dass bei der Montage von zwei Bauteilen aus zwei Teilmengen des Produkts alle Kontakte zwischen den Teilmengen hergestellt werden (vgl. 3.2.3.3). Somit ist implizit die Teilekonfiguration des resultierenden Produktzustands gegeben (HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991b).

Der Produktzustand der in Abbildung 8 (S. 24) vorgestellten Baugruppe ist vor Montagestart durch den Binärvektor (0, 0, 0, 0, 0) bestimmt. Nach dem erfolgreichen Abschluss der Montage ist der Zustand des Produkts durch den Binärvektor (1, 1, 1, 1, 1) beschrieben. Wird in einer ersten Montageoperation das Elektronikmodul E in das Gehäuse G eingesetzt, so kann im Anschluss der Produktzustand durch den Vektor (1, 0, 0, 0, 0) angegeben werden.

3.2.3.5 Abbildung durch Teilemengen

Die Abbildung von Produktzuständen durch die zugehörigen Teilmengen (an Bauteilen) ergibt die Repräsentation mit dem geringsten Informationsgehalt. Es wird davon ausgegangen, dass im Zuge eines Montagevorgangs alle Verbindungen zwischen den beteiligten Bauteilen und -gruppen hergestellt werden. Unter dieser Annahme kann jeder im Laufe des Montageprozesses bestehende Produktzustand durch eine Teilmenge an Bauteilen des fertigen Produkts beschrieben werden (HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991a).

3.2.3.6 Zwischenfazit

Die Identifikation des aktuellen Zustands in der Montageumgebung hängt von den technischen Möglichkeiten und der formellen Abbildung in der Graphenstruktur ab. Einerseits ist es hinsichtlich Performanz und Restriktion der Datenspeicherung nicht sinnvoll, alle verfügbaren Charakteristika des Produktzustands unmittelbar zu hinterlegen. Andererseits ist eine eindeutige Bestimmung durch den Abgleich der erkannten Informationen mit dem vorliegenden Modell zu gewährleisten. Aufbauend auf den Elementen der Verfahren sind in Tabelle 3 die relevanten Beschreibungselemente bezüglich der folgenden Kriterien einander gegenübergestellt und anhand von deren Abbildbarkeit (ja/nein) bewertet:

- Geometrie: Abbildung der geometrischen Zusammenhänge von Bauteilen, Baugruppen und des Produkts
- Position: Abbildung der Position von Bauteilen und -gruppen und der Position von Kontakten (relativ/absolut)
- Kontakte: Abbildung des Kontaktzustands von zwei Oberflächen
- Verbindungen: Abbildung der Art der Verbindung eines Kontakts
- Zusammensetzung: Abbildung des Zustands einer mittelbaren oder unmittelbaren Verbindung von zwei Bauteilen (Komposition)

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Beschreibungselemente der Verfahren zur Abbildung von Produktzuständen (abbildbar ja/nein)

		Beschreibungselemente				
		Geometrie	Position	Kontakt	Verbindung	Zusammen -setzung
Verfahren	3D-CAD	ja	ja	ja	ja	ja
	Relationales Modell	ja	ja	ja	ja	ja
	Binärvektor	nein	nein	ja	nein	ja
	Teilemengen	nein	nein	nein	nein	ja

Unter diesem Gesichtspunkt sind die Modelle in Abbildung 18 zur Repräsentation von Produktzuständen in der Reihenfolge eines absteigenden Informationsge-

halts dargestellt. Entsprechend der vorhandenen Informationsgrundlage, den technischen Möglichkeiten im Rahmen der Montageumgebung und der gewünschten Ausprägung der Werkerassistenz ist eine anwendungsbezogene Auswahl zu treffen.

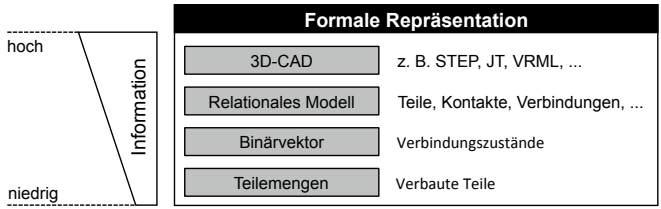


Abbildung 18: Informationsgehalt der unterschiedlichen formalen Repräsentationen des Produktzustands

3.2.4 Komplexität von Fügevorgängen

3.2.4.1 Allgemeines

Planungsverfahren der Montage beziehen als notwendige Eingangsgröße bezüglich der Bestimmung sinnvoller Arbeitsanweisungen sowie der Austaktung von Vorgängen den zeitlichen Aufwand der auszuführenden Tätigkeiten mit ein. Zugleich geht diese Größe in die Berechnungen zur Entlohnung und Kapazitätsbestimmung ein (REFA 1990). Dieser Aufwand kann mit der Komplexität der Tätigkeit in Verbindung gebracht werden. Bestehende Maße zur Bestimmung und/oder Festlegung der Komplexität von Tätigkeiten in der manuellen Montage nehmen mehrheitlich Bezug auf die physischen Merkmale der Montageobjekte, welche die Schwierigkeit ihrer Montage beeinflussen.

3.2.4.2 Merkmalsorientierte Verfahren

Als bekanntester Vertreter fassen die Systeme vorbestimmter Zeiten (SvZ) weltweit anerkannte Methoden und Verfahren zur Bestimmung von Ausführungszeiten in der Montage zusammen. Die einzelnen Ausprägungen lassen sich anhand der eingehenden Faktoren und des zugehörigen Detaillierungsgrades unterscheiden. Dabei werden die (Teil-)Arbeitsvorgänge mit manuellen Tätigkeiten oder einfachen geistigen Entscheidungen in Bewegungselemente (z. B. Bringen) und

mentale Funktionen (z. B. Identifizieren) unterschieden. Die Mehrzahl der Montagetätigkeiten (ca. 80 Prozent) kann demnach anhand von fünf Grundbewegungen beschrieben werden (siehe Abbildung 19).

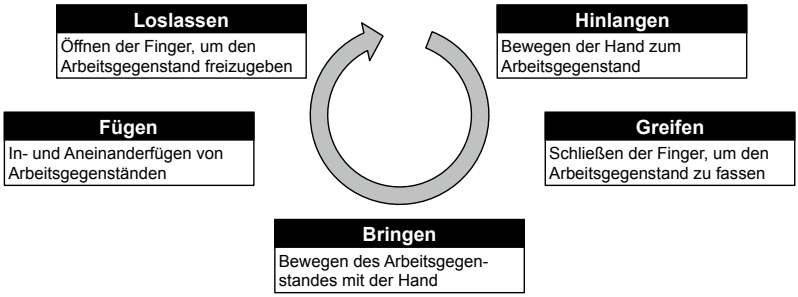


Abbildung 19: MTM-Zyklus nach HELMS (1991) und PICKER (2007)

Jedem Bewegungselement und jeder Funktion ist eine standardisierte Zeiteinheit zugeordnet. Die Größe der Zeiteinheit korrespondiert mit den jeweiligen Einflussfaktoren, wie z. B. der Länge eines Bewegungsweges oder der Genauigkeit einer Platzierung. Systeme vorbestimmter Zeiten können nur angewendet werden, wenn der betrachtete (Teil-)Vorgang vollständig durch den menschlichen Arbeiter beeinflussbar ist. Die Entwicklungen sämtlicher SvZ-Verfahren besitzen ihren Ursprung in der Bewegung-Zeit-Analyse (engl. *Motion Time Analysis*) von A. B. SEGUR im Jahr 1924 (MAYNARD et al. 1948). Die Systeme vorbestimmter Zeiten MTM (engl. *Methods of Time Measurement*) und das WF-Verfahren (Work-Factor) sind in der deutschen Industrie am gebräuchlichsten, wobei ersteres eine erheblich weitere Verbreitung aufweisen kann (WESTKÄMPER et al. 1998).

Kern der Methode des *Design for Assembly* (DFA) nach BOOTHROYD & ALTING (1992) ist die Vereinfachung eines Produkts durch die kritische Hinterfragung der Notwendigkeit jeder Baugruppe und jedes Einzelteils. Die Anwendung der Methode wird unter der Annahme ausgeführt, dass eine Reduktion der Anzahl an Baugruppen und Teilen mit einem reduzierten Aufwand in der Montage einhergeht. Es wird davon ausgegangen, dass die Reduzierung des Aufwands unabhängig von der Komplexität der jeweils betrachteten Baugruppen ist. Im Anschluss an die zeitliche Evaluierung der Montagevorgänge wird die gefundene Lösung einer theoretisch optimalen Arbeitsfolge gegenübergestellt. Obgleich der Schwerpunkt der Methode des DFA auf der Evaluierung und Verbesserung der

Konstruktion eines Produkts liegt, ist mit ihr ebenso ein Verfahren zur Ableitung von Montagezeiten gegeben. Die Grundlage ist dabei die Betrachtung der Handhabungs- und Fügevorgänge pro Teil unter Einbeziehung eines der Methode eigenen Systems vorbestimmter Zeiten beziehungsweise der Aufnahme von Zeiten im Rahmen von Zeitstudien.

Die *Assembly Evaluation Method* (AEM) ähnelt der Methode des DFA. Die Analyse der sogenannten Montagegerechtigkeit findet im Rahmen eines gruppenorientierten Vorgehens statt und bildet die Basis für die Ableitung der Komplexität einer Montagetätigkeit. Eine Erweiterung der Methode durch die General Electric Company erlaubt die Bestimmung von Ausführungszeiten der Montagevorgänge (MIYAKAWA & OHASHI 1986). In einem Entwurf wird jedem Vorgang ein charakteristischer Zahlenwert zugeordnet. Unter der Berücksichtigung von Verhältniszahlen des Montageumfelds bezüglich des Montageobjekts kann hieraus ein Zusammenhang zu einer zeitlichen Bewertung hergestellt werden. Die Basis der Komplexitätsbestimmung bildet ein System vorbestimmter Zeiten für Fügevorgänge. OHASHI et al. (2002) stellen auf Grundlage dieser Arbeiten die *Extended Assembly Evaluation Method* (AEM-II) vor. Aufbauend auf dem Vorgehen nach AEM wird ein Prozessmodell beschrieben, welches ein bereits konstruiertes Produkts anhand von dessen Einfachheit der Montage (engl. *ease of assembly*) bewertet. Die ermittelte Komplexität begründet sich weiterhin auf einem System vorbestimmter Zeiten.

Die Methodik *Designers' Aid for Simulations Engineering* (DAISIE) ist wesentlich auf DFA und AEM begründet (ISHII et al. 1988). Ihre Ergebnisse sind mit den beiden zuvor erläuterten Verfahren vergleichbar. DAISIE zeichnet sich durch eine verbesserte Benutzerführung und die Einbeziehung eines Expertensystems aus.

Das Komplexitätsmaß nach HINCKLEY (1994) stellt einen Zusammenhang zwischen der Anzahl an Teilarbeitsvorgängen und den zugehörigen Ausführungszeiten und der relativen Häufigkeit von Montagefehlern her. Der grundlegende Zusammenhang und die Erweiterung dieses Ansatzes sind in Verfahren zur Vorhersage von Montagefehlerklassen eingeflossen (BEITER et al. 2000, SHIBATA et al. 2003). Die von KIM (1999) vorgestellten Maße zur Bestimmung des Ursprungs der Systemkomplexität beziehen die Zusammenhänge zwischen den Strukturkennzahlen eines Systems (z. B. Anzahl an möglichen Ablaufpfaden, Weglängen) und den Kennzahlen der Elemente des Systems (z. B. Anzahl der Elemente, Zuverlässigkeit, Durchlaufzeit) in die Berechnung mit ein. Diese

Sammlung an Methoden integriert Teile der Produkt- und Vorgangskomplexität. Sie kann nicht ohne weiteres auf andere Branchen und Teilbereiche der Fertigung und Montage übertragen werden. ELMARAGHY & URBANIC (2004) diskutieren einen Entropie-basierten Ansatz zur Bestimmung der Fertigungskomplexität, dessen Schwerpunkt auf der Auswahl von Fertigungssystemen mit der niedrigst möglichen Komplexität auf zuvor festgelegten Faktoren liegt. Eine Eignung für die operative Anwendung auf die ausführende Ebene ist nicht nachgewiesen.

RICHARDSON et al. (2004) gehen davon aus, dass allein die physischen Eigenschaften einer Montageaufgabe deren grundlegende Komplexität bestimmen. Sie identifizieren sieben Aufgabenkenngrößen (engl. *task variables*), welche signifikant die wahrgenommene Komplexität einer Tätigkeit beeinflussen. Eine Beschränkung der Untersuchungen liegt in der rein graphischen Darstellung der Anweisungsinformationen. Das Verfahren wird als Werkzeug zur Unterstützung der Methode des *Design for Assembly* (DFA) gesehen (RICHARDSON et al. 2006).

3.2.4.3 Kognitive Prozesse in der manuellen Montage

Die Ausbringung von Produktions- und Montagesystemen hängt unter anderem von der individuellen Leistung von Werkern und der Stochastik einzelner Vorgänge ab. Diesen beiden Faktoren wurde ursprünglich in der Gestaltung von Produktions- und Montagesystemen nicht Rechnung getragen. Erst in den 1980er-Jahren wurde die Notwendigkeit erkannt, Unsicherheiten bei der Ausführung von Vorgängen zuzulassen. Folglich konnte in Montagesystemen mit parallelen Prozessen ein Ausgleich hinsichtlich der Variabilität der Leistung einzelner Werker geschaffen werden (BUZACOTT 2002). Ziel war die Reduktion der Variabilität der Arbeitszeit des gesamten Systems. Die Montage eines Produkts durch einen einzelnen Werker und somit die Betrachtung der durch Wahlfreiheit des Montagevorgangs erzeugten Unsicherheit war nicht Teil der Arbeiten.

Die Komplexität von Fügevorgängen ist eng mit der Leistung des Werkers hinsichtlich der Ausführung von Montageoperationen verbunden. Diese einzubeziehen bedingt ein Verständnis der zugrunde liegenden kognitiven Prozesse. Die mentalen Ressourcen des Menschen sind beschränkt. Sie müssen verteilt und relevanten Aufgabenaspekten zugeordnet werden (BOKRANZ & LANDAU 2006).

Traditionelle Theorien der Informationsverarbeitung des Menschen gehen davon aus, dass die Stufen der mentalen Verarbeitung in sequenzieller Ordnung durchlaufen werden. Hinsichtlich dieser Theorien sind in Tabelle 4 die relevanten Ver-

arbeitungsstufen und Ressourcen für die Montagefunktionen *Kommissionieren* und *Fügen* detailliert. Die Wahrnehmung beinhaltet die Vorverarbeitung des Stimulus, die Merkmalsextraktion und die Identifikation des Stimulus. Dies bedeutet, dass die Informationen in einer Anweisung zuerst lokalisiert werden müssen, bevor die visuelle Aufmerksamkeit auf die relevanten Details gerichtet werden kann. Für die Kommissionierung heißt dies, dass ein entsprechendes Bauteil zuerst örtlich bestimmt werden muss, dann auf der Teileliste zu identifizieren und anschließend in einem Lagerbereich zu suchen und zu finden ist. Während des Fügens gilt Ähnliches. Die Montageanweisung ist zu lokalisieren und sowohl die notwendige Positionierung als auch die Orientierung sind zu identifizieren. Im Folgenden sind Aktionen und Reaktionen auszuwählen und auszuführen. Bezüglich der Ausführung der ausgewählten Aktion können Kennwerte der Montageobjekte (Bauteile, Baugruppen) helfen, die Bewegungs- und Greifzeiten abzuschätzen.

Tabelle 4: Stufen der mentalen Verarbeitung und Ressourcen manueller Montagefunktionen

Mentale Verarbeitung	Montagefunktionen		Ressourcen
	Kommissionieren	Fügen	
Wahrnehmung	▪ Lokalisierung der Stückliste ▪ Verarbeitung der Charakteristika ▪ Identifizierung der Bauteile ▪ Lokalisierung der Bauteile im Greifbereich	▪ Lokalisierung der Anweisung ▪ Verarbeitung von Position und Orientierung der Bauteile	Aufnahmemodalitäten
Entscheidung	▪ Entnahme/Greifen der Bauteile	▪ Fügen der vorgegebenen Bauteile/-gruppen	Verarbeitungscodes
Ausführung	▪ Hinlangen ▪ Greifen ▪ Bringen	▪ Fügen ▪ Loslassen	Ausführungsmodalitäten

Bei der Anwendung von merkmalsorientierten Verfahren wird der Aufwand jedes Vorgangs bzw. jedes Montageprimitivs unabhängig von der vorangegangenen oder nachfolgenden Aktion auf der Grundlage physischer Merkmale ermittelt (vgl. Abschnitt 3.2.4.2, S. 39 ff.).

Es ist jedoch festzustellen, dass komplexe Vorgänge nicht derart gemessen und bewertet werden können. Dies resultiert aus der Beeinflussung unterschiedlicher mentaler Teilvorgänge. Obwohl es dem Menschen gelingt, gleichzeitig mehrere

Aktionen auszuführen, bestehen Beschränkungen hinsichtlich der jeweiligen mentalen Steuerungsprozesse. WICKENS (2002) schlägt in der Begründung der Theorie multipler Ressourcen (engl. *multiple-resource theory*) vor, die mentalen Verarbeitungsressourcen anhand von vier Merkmalen zu beschreiben:

- Aufnahmemodalität (visuell - auditiv)
- Verarbeitungscodes (räumlich - verbal)
- Verarbeitungsstufe (Wahrnehmung - Entscheidung - Ausführung)
- Ausführungsmodalität (motorisch - sprachlich)

Nach der Theorie der multiplen Ressourcen ist bei der zeitgleichen Bearbeitung von Aufgaben die Leistung des Menschen durch limitierte mentale Ressourcen in den Verarbeitungsstufen *Wahrnehmung*, *Entscheidung* und *Ausführung* beeinflusst. Für die Aufnahmemodalitäten *visuell* und *auditiv* sowie für räumliche und verbale Verarbeitungscodes (der Informationen) stehen jeweils getrennte Ressourcen zur Verfügung. Die visuelle Aufnahmemodalität kann zudem nach *peripherer Wahrnehmung* und *fokaler Wahrnehmung* unterteilt werden. Es ist hervorzuheben, dass für die Wahrnehmung und für die Entscheidung lediglich eine gemeinsame Ressource zur Verfügung steht (siehe Abbildung 20).

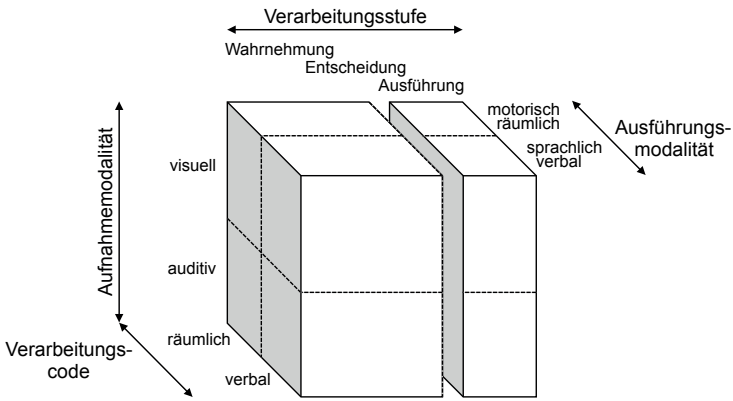


Abbildung 20: Modell der multiplen Ressourcen nach WICKENS (2002)

SHALIN et al. (1996) zeigen anhand einer symbolischen, rechnergestützten Analyse an einem beispielhaften Montageprozess die kognitiven Bestandteile manu-

eller Montageoperationen auf. Es wird hergeleitet, dass Systeme vorbestimmter Zeiten keine Unterscheidung dieser Komplexität ermöglichen. Unter Anwendung der Informationstheorie und bis zu diesem Zeitpunkt bekannter Verfahren können kritische Montageprimitive in dem Vorgang bestimmt werden. Eine Aussage hinsichtlich des Inhalts oder des qualitativen Zusammenhangs ist nicht möglich. Es wird der Schluss gezogen, dass die Produktentwicklung und -gestaltung zwar den kognitiven Anspruch insbesondere in der Kleinserienmontage reduzieren können, jedoch weitere Forschungsarbeiten in diesem Themenfeld notwendig sind.

Im Rahmen der Gestaltung von kooperativen Mensch-Roboter-Arbeitsplätzen ist es notwendig, eine Vorhersage bezüglich der Dauer der von dem menschlichen Arbeitspartner ausgeführten Tätigkeiten zu treffen. Begründet ist dies in den Anforderungen nach Effizienz, Sicherheit und Akzeptanz. Aufbauend auf der experimentellen Analyse eines ausgewählten Montagevorgangs wurde ein mentales Modell für diesen entwickelt und in ein kooperatives Mensch-Roboter-System implementiert. Anhand dieser experimentellen Analyse zeigen HUBER et al. (2010), dass eine lineare Abhängigkeit zwischen der im Experiment festgelegten Komplexität und der zeitlichen Dauer eines Montageprimitivs vorliegt.

3.2.4.4 Zwischenfazit

Die Einbeziehung von Informationsverarbeitungsprozessen und kognitiven Prozessen in die operative Planung weist trotz der starken Verbreitung der manuellen Montage nur einen geringen Beachtungsgrad auf. Dies trifft sowohl auf die ganzheitliche Betrachtung des Montageprozesses als auch auf das Umfeld der Montage zu. Es ist zu schließen, dass die Merkmale, welche die Leistung innerhalb von ablaufbedingten Montageoperationen beeinflussen, noch nicht vollständig identifiziert sind. Bestehende Maße der Komplexität von Montageoperationen beziehen zum größten Teil lediglich die physischen Merkmale der Objekte und die physischen Merkmale der notwendigen Bewegungen, wie z. B. den Weg und die Passgenauigkeit, mit ein. Ein Zusammenhang von Merkmalen der Montagaufgabe und der zugehörigen Komplexität wird von wenigen Autoren aufgezeigt. Die ermittelten Zusammenhänge werden in Regressionsmodelle zur Prognose der zeitlichen Dauer von, durch graphische Anweisungen vorgegebene, Montagevorgänge integriert. Dies beschränkt sich jedoch auf ausgewählte und isolierte Montagevorgänge.

SALVENDY (2004) unterstützt die Aussage, dass Systeme vorbestimmter Zeiten nicht zwischen den Aspekten der Wahrnehmung und der Motorik von Montageprimitiven unterscheiden. Dieser Aufsatz und später zu beschreibende, eigene Studien des Verfassers (vgl. Abschnitt 5.2.2.5, S. 88 ff.) legen nahe, dass die notwendige Zeitspanne zur Wahrnehmung und zur Verarbeitung weder für jedes Montageprimitiv konstant noch unabhängig von der Reihenfolge der Montagesequenz ist.

3.2.5 Datenstrukturen der Digitalen Fabrik

Durch den Anstieg der in der Planung und Steuerung entstehenden Informationsmenge, insbesondere der damit einhergehenden Dynamik und der verbundenen Datenmenge, ist die Notwendigkeit an neuen Konzepten des Informationsmanagements bereits vielfach erkannt worden (STEINWASSER 1997, RUDOLF 2007, KLUßMANN 2009). Daher ist es unabdingbar, aus vorhandenen Daten und Informationen relevantes Wissen verfügbar zu machen und entsprechend abzubilden (MÜLLER 2008). In verschiedenen Arbeiten wurde hierbei auf eine Vielzahl von Zusammenhängen und Abhängigkeiten zwischen Produkten, Prozessen und Ressourcen bzw. Betriebsmitteln hingewiesen (STEINWASSER 1997, JONAS 2000, RUDOLF 2007).

Zur Verkürzung des Produktentstehungsprozesses entwickelt JONAS (2000) in seiner Arbeit eine Methode für die durchgängige, rechnergestützte Planung von Montageanlagen, in der alle Informationen der Montageplanung in einem Datenmodell abgebildet werden. Hierfür wurde ein systemunabhängiges Datenmodell entworfen, welches sich an die Struktur von STEINWASSER (1997) anlehnt. Neben den bereits bekannten Hauptklassen *Produkt*, *Prozess* und *Ressource* wurde das Modell um die Hauptklasse „Verbindungsinformationen“ erweitert, um für die Montageplanung wichtige Prozessinformationen im Planungsprozess berücksichtigen zu können. Durch die systemunabhängige Modellierung ist die Voraussetzung für eine einfache Integration des rechnergestützten Planungsvorgehens in bestehende Systeme über standardisierte Schnittstellen erfüllt.

In den Verfahren der zuvor genannten Arbeiten werden die Verknüpfungen zwischen den Hauptklassen *Produkt*, *Prozess* und *Ressource* manuell erstellt, wobei das hierfür notwendige Wissen nur implizit vorhanden ist. Da dies zu einer erschwerten Wiederverwendbarkeit des Planungswissens führt, wird von RUDOLF (2007) ein Konzept zur wissensbasierten und integrierten Prozessplanung für die variantenreiche Montage entwickelt. Ziel seines Ansatzes ist eine gemeinsame

Planung von Produkt und Montageanlage, die über die dazugehörigen Montagevorgänge miteinander verknüpft werden. Dabei werden die aus den Hauptklassen *Produkt*, *Prozess* und *Ressource* bestehenden Planungsgrundlagen mit den dazugehörigen Verknüpfungen automatisiert aus einem Prozessplanungssystem in ein wissensbasiertes System übertragen.

MÜLLER (2008) beschreibt ein Modell für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Das Modell bildet Wissen über die zur Verfügung stehenden Montageverfahren ab. Dabei werden mögliche Wechselwirkungen sowohl zwischen dem Produkt und den Verfahren als auch zwischen den einzelnen Verfahren berücksichtigt. Um eine Zuordnung der Produkte zu den zur Verfügung stehenden Verfahren zu gewährleisten, werden übergeordnete Produktklassen definiert. In diesen sind Produkte mit gleichen bzw. ähnlichen Ausprägungen hinsichtlich des Funktionszwecks, der Beanspruchung und geometrischen und wirkprinziporientierten Ähnlichkeiten zusammengefasst. Auf Basis der identifizierten Produktionsalternativen findet abschließend eine wirtschaftliche Bewertung der generierten Verfahrenskette statt.

Der durchgängige und geregelte Zugriff aller am Produktentstehungsprozess beteiligten technischen Komponenten/Systeme und Nutzer ist für die Flexibilität eines Montagesystems von entscheidender Bedeutung. Weniger der Grad der Digitalisierung als vielmehr der Grad der Durchgängigkeit ist dabei relevant (MATYSCZOK & MEYER 2009). Mit Hilfe der Datenmodelle soll eine ganzheitliche Strukturierung aller Informationen der Montageumgebung gewährleistet werden. Den Aspekten der durchgängigen Fabrik- und Prozessplanung, der ganzheitlichen Optimierung und der ständigen Veränderung von digitalen, vernetzten und wissensbasierten Produktionssystemen ist Rechnung zu tragen (WEIMER et al. 2008). Aus Sicht von BLEY & BOSSMANN (2005) muss es das Hauptziel sein, auch in heterogenen Systemlandschaften Daten, Produktstrukturen und Modellinformationen austauschen zu können. Es wird dabei unter anderem die Notwendigkeit einer zentralen Datenbank zur Verwaltung und Strukturierung der Daten angeführt, wie sie von Feldmann (1997) und Cuiper (2000) in einem universitären Demonstrator implementiert wurde.

3.3 Optimierung von Montageabläufen und -sequenzen

3.3.1 Allgemeines

Die Fragestellung zur Ermittlung der optimalen bzw. effizientesten Folge von Montageoperationen entspricht bei gegebener Gesamtheit aller Montagesequenzen (oder einer Auswahl davon) einem Problem zur Ermittlung der kürzesten Wege.

Hinsichtlich der Verfahren zur Ermittlung der kürzesten Wege auf einem Graphen G = (V, E) sind drei grundsätzliche Problemstellungen zu unterscheiden:

- Das *single-source-shortest-path*-Problem hat das Ziel, den jeweils kürzesten Weg von einem Startknoten $s \in V$ zu allen Knoten $v \in V$ des Graphen zu finden.
- Im Rahmen des *single-destination-shortest-path*-Problems ist von allen Knoten $v \in V$ in dem Graphen der kürzeste Weg zu einem Zielknoten $z \in V$ zu ermitteln.
- Die Lösung des *all-pairs-shortest-path*-Problems führt zu der Identifikation des jeweils kürzesten Weges zwischen allen Konten $v \in V$ des Graphen.

Es ist kein Algorithmus bekannt, welcher das Problem der Ermittlung des kürzesten Weges zwischen einem Startknoten und einem Zielknoten im schlechtesten Fall in geringerer Zeit löst, als Verfahren zur Lösung des *single-source-shortest-path*-Problems. Das Problem *single-destination-shortest-path* ist bei Umorientierung aller Kanten eines Graphen äquivalent zu dem *single-source-shortest-path*-Problem. Jedes Verfahren zur Lösung des *single-source-shortest-path*-Problems ist bei $|V|$-facher Anwendung zur Lösung des *all-pairs-shortest-path*-Problems geeignet (TURAU 2009). Die grundlegende Aufgabe der Montage zur Herstellung eines Gutes höherer Ordnung entspricht graphentheoretisch dem *single-destination-shortest-path*-Problem (bzw. dem äquivalenten *single-source-shortest-path*-Problem).

3.3.2 Verfahren zur Ermittlung kürzester Wege in Graphen

3.3.2.1 Dijkstra-Algorithmus

Der Algorithmus von DIJKSTRA (1959) löst das *single-source-shortest-path*-Problem auf Graphen mit positiver Gewichtung. Dabei wird schrittweise ein Baum kürzester Wege erzeugt, indem im i+1-ten Schritt des Verfahrens derjenige Knoten $v \in V$ in den Baum aufgenommen wird, welcher den i+1-kürzesten Abstand zu einem Startknoten $s \in V$ besitzt. Existiert kein Weg zwischen dem Startknoten s und einem Zielknoten $z \in V$, so ist die Distanz $d(s, z) = \infty$. Der Algorithmus terminiert, wenn ein Zielknoten z in den Baum kürzester Wege aufgenommen wird.

Der Algorithmus von Dijkstra ist in Verbindung mit sog. Beschleunigungstechniken Grundlage der Routenplanung in Verkehrsnetzen (DELLING et al. 2009). Er ist durch eine Zeitkomplexität $O(|V|^2)$ charakterisiert. Die Laufzeit kann bei geeigneter Implementierung bis auf $O(|V| \cdot \log|V| + |E|)$ reduziert werden.

3.3.2.2 Algorithmus von D'Esopo (Dequeue-Algorithmus)

Die Anwendung des Algorithmus von D'Esopo ermöglicht die Lösung des *single-source-shortest-path*-Problems auf Graphen mit positiver Gewichtung. Die aufwendige Minimumsuche des Dijkstra-Algorithmus wird dabei vermieden (DOMSCHKE 2007). Jeder Knoten des Graphen wird mit einer Indexnummer und der kürzesten bekannten Distanz zum Startknoten $s \in V$ markiert. Dabei wird in Kauf genommen, dass ein Knoten gegebenenfalls mehrmals betrachtet wird. Anhand des Index eines Knotens wird entschieden, ob ein neuer Knoten einbezogen wird oder ob die Distanz des aktuellen Knotens korrigiert werden muss. Die zum Ende der Laufzeit des Algorithmus markierten Knoten bilden den Baum der kürzesten Wege.

Die Zeitkomplexität des Algorithmus ist im besten Fall $O(|V|)$. Dies gilt für Graphen mit geringer Kantendichte, welche z. B. durch Einschränkungen auf der Graphenstruktur erreicht werden kann. Im schlechtesten Fall wird im Rahmen des Verfahrens eine Zeitkomplexität $O(|V| \cdot 2^{|V|})$ erreicht.

3.3.2.3 A*-Algorithmus

Der A*-Algorithmus nach HART et al. (1968) ist eine Erweiterung des Algorithmus von Dijkstra (siehe Abschnitt 3.3.2.1, S. 49 ff.). Das Verfahren findet auf positiven Graphen Anwendung und berechnet den kürzesten Weg zwischen einem Startknoten $s \in V$ und allen Knoten $v \in V$, sofern diese erreichbar sind. Das Verfahren bezieht eine Schätzfunktion f: $V \times V \rightarrow \mathbb{R}+$ bezüglich der tatsächlichen Distanz d: $V \times V \rightarrow \mathbb{R}+$ zwischen zwei Knoten des Graphen ein. Ziel der Einbeziehung der Schätzfunktion ist die Reduzierung des Betrachtungsraumes der Breitensuche auf dem Graphen G. Analog zum Algorithmus von Dijkstra wird beim A*-Algorithmus schrittweise ein Baum kürzester Wege erzeugt. Die Selektion aufzunehmender Knoten bezieht dabei nicht nur die Länge des bereits zurückgelegten Weges mit ein, sondern auch die geschätzte Länge des Restweges. Der A*-Algorithmus terminiert, wenn ein Zielkonten $z \in V$ erreicht ist.

Die Zeitkomplexität des Algorithmus wird wesentlich durch die Wahl der Schätzfunktion f bestimmt. Im Fall der schlechtesten Schätzfunktion $f \equiv 0$ entspricht die Zeitkomplexität der des Algorithmus von Dijkstra $O(|V|^2)$ bzw. $O(|V| \cdot \log|V| + |E|)$. Im Fall der Schätzfunktion $f(v_i, v_j) = d(v_i, v_j)$ mit $v_i, v_j \in V$, ist der Aufwand $O(|V|)$.

3.3.3 Kürzeste Wege in Graphen mit anwendungsbezogener Modifikation

Nach SCHMID (2001) können in der Routenplanung verschiedene Konzepte verfolgt werden, um die Verfahren hinsichtlich ihrer Laufzeit an große Datenmengen und reale Anwendungen anzupassen. In der manuellen Montage stellen sich folgende Ansätze als praktikabel dar:

- Veränderung des Graphen zur Reduzierung der zu betrachtenden Knoten: Im Rahmen der Planungsphase wird die Anzahl an Knoten und Kanten des Montagegraphen bei der Ermittlung von mechanisch und geometrisch sinnvollen Montagesequenzen im Vorfeld minimiert. Die resultierenden Ergebnisse gewährleisten zum einen die Montierbarkeit des Produkts. Zum anderen wird die Qualität der durch den Algorithmus ermittelten Ergebnisse nicht gemindert.

- Hierarchischer Ansatz: Der Algorithmus zur Ermittlung des kürzesten Weges von einem Start- zu einem Zielknoten wird auf einem ausgedünn-

ten, zusammenhängenden Teilgraphen ausgeführt. Die Berechnung erfolgt auf Basis von Schätzungen oder zuvor ermittelten Distanzen. Hier können Fehler auftreten, die gerade bei der Berechnung von sehr nahe beieinanderliegenden Knoten zu offensichtlich unbrauchbaren Ergebnissen führen.

- Ähnlichkeit der Montage: Kürzeste Wege für häufig zu montierende Baugruppen oder Teile des Produkts werden im Vorfeld der operativen Anwendung berechnet und in der Graphenstruktur hinterlegt.

3.3.4 Zwischenfazit

Die betrachteten Algorithmen zur Ermittlung der kürzesten Wege in einem Montagegraphen sind nach CORMEN et al. (2007) korrekt, vollständig und optimal. Das Verfahren von D'Esopo eignet sich insbesondere für Graphen mit geringer Kantendichte. Trotz des für praktische Anwendungen günstigen Laufzeitverhaltens kann gezeigt werden, dass die Zeitkomplexität mit $O(|V| \cdot 2^{|V|})$ im schlechtesten Fall nicht beherrschbar ist. Eine Eignung des Algorithmus für die Problemstellung der operativen Montagesequenzbestimmung ist somit nicht gegeben. Der Dijkstra-Algorithmus bezieht die zusätzliche, in der Graphenstruktur enthaltene Information, welche z. B. durch eine Vorbelegung von Kanten ermittelt werden kann, nicht ein. Somit ist die tatsächliche Laufzeit des Algorithmus vollständig dem operativen Betrieb eines Systems zur situationsorientierten Werkerführung zuzuordnen. Der Dijkstra-Algorithmus kann als Sonderfall des A*-Algorithmus betrachtet werden, bei dem die heuristische Schätzfunktion für jeden Knoten den Wert 0 ausgibt. Der A*-Algorithmus eignet sich aufgrund der möglichen Beschleunigungstechniken durch Nutzung einer Schätzfunktion f und bei anwendungsbezogenen Modifikationen der Graphenstruktur insbesondere für Anwendungen mit einer hohen Anzahl an Knoten zwischen dem Startknoten und dem Zielknoten. Die Voraussetzung ist in der Anwendung „situationsorientierte Werkerführung“ gegeben.

3.4 Zusammenfassung und Ableitung von Handlungsfeldern

Die Steigerung der Mitarbeiterkompetenz am Arbeitsplatz durch die Verbesserung des Informationsflusses ist ein Element zur Steigerung der Montageeffizienz. Die aktuelle und für die Zukunft prognostizierte Arbeitsmarktlage ist im Bereich der Montage durch einen Fachkräftemangel geprägt. Dieser Mangel wird

durch eine Veränderung der Belegschaft hin zu weniger qualifizierten Mitarbeitern kompensiert. Die Folge dieser Entwicklung ist das Vorhandensein einer Vielzahl unterschiedlicher Wissensstände und Erfahrungspotenziale bezüglich der zu montierenden Produkte. Die gezielte Unterstützung des individuellen Mitarbeiters durch neue Möglichkeiten der Informationsaufbereitung und -strukturierung sowie die Beachtung der unterschiedlichen Wissensstände bilden dabei einen Lösungsansatz.

FELDMANN et al. (2002) empfehlen den Einsatz eines entsprechenden Informationssystems in Bereichen mit häufig wechselnden Aufgaben, ungeübten Tätigkeiten oder hochintegrierten Arbeitsinhalten. Durch die geeignete Bereitstellung der Informationen am Arbeitsplatz können sowohl die Lerngeschwindigkeit der Werker erhöht als auch die Zeiten für Such- und Orientierungsvorgänge reduziert werden. Hierdurch ist ein effizientes Erreichen der wirtschaftlichen Montage möglich, ohne dabei die Flexibilität der Werker nennenswert einzuschränken.

Grundlage für diese Konzepte ist eine entsprechende Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen, welche die Erfüllung dieser Anforderungen unterstützt. In diesem Rahmen wurde der Stand der Erkenntnisse hinsichtlich der Modellierung und Optimierung von Montageabläufen und -sequenzen aufgezeigt. Im Folgenden wird dies bezüglich der von den Randbedingungen der Montagetätigkeit und des Montageumfelds abzuleitenden Anforderungen und der Konzeptentwicklung zusammengefasst.

Die anwendungsbezogenen Defizite einer Repräsentation sind aufgrund der strukturellen Zusammenhänge auf andere Verfahren übertragbar. Den produktionstechnischen Ansätzen ist die weiterhin starre Verknüpfung der Ablaufelemente gemein, welche die Eigenschaften des Werkers vernachlässigt.

Die korrekte Abbildung des Produktzustandes als führendes Element in der situationsorientierten Werkerführung ist von zwei Faktoren abhängig:

- der Verfügbarkeit einer geeigneten Datenbasis in der Anwendung und
- den technischen Möglichkeiten zur Erkennung von Kontext und Zustand.

Unter Berücksichtigung dieser Entscheidungskriterien ist bei der Entwicklung zu beachten, dass eine Wahlfreiheit des Anwenders bei der Repräsentation zur Abbildung von Produktzuständen besteht. Dies ist im Datenmodell vorzusehen.

Verfahren zur Abbildung der Komplexität von Fügevorgängen beschränken sich mehrheitlich auf die physischen Bezugsgrößen der Montageoperation. Weder findet die kognitive Beanspruchung des Werkers Eingang in die Ermittlung des Montageaufwandes noch werden die daraus resultierenden Erkenntnisse hinsichtlich der Belastung zur Steuerung des Informationsflusses in Richtung des Werkers angewandt.

Die Schwerpunkte der Arbeiten im Bereich der Modellierung von Planungsdaten liegen vor allem auf der Nutzung für die Planung von einzelnen Fertigungs- und Montageabläufen bzw. der Generierung und anschließenden Bewertung von Produktionsalternativen. Eine durchgehende Anwendung der Modelle, von der Planung bis hin zur Ausführung auf operativer Ebene in Echtzeit, ist teilweise umgesetzt. Es besteht die Forderung nach einer gemeinsamen Datenbasis von der Konstruktion bis zur Montage, welche einen durchgängigen Informationsfluss ermöglicht und Inkonsistenzen vermeidet. Die auf der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung wirkenden Mechanismen, insbesondere der Algorithmus zur Bestimmung der auszugebenden Montagesequenz, sind in deren Abhängigkeit zu entwerfen.

Im folgenden Kapitel werden im Rahmen der Anforderungsanalyse die Randbedingungen ermittelt, welche für den Einsatz von Formalismen in der situationsorientierten Werkerführung zu beachten sind. Es werden die Ergebnisse einer durchgeführten Studie zur Gestaltung situationsorientierter Montageassistenz vorgestellt. Die davon abgeleiteten Anforderungen gliedern sich in konzeptionelle, technische und benutzerorientierte Aspekte.

4 Anforderungsanalyse

4.1 Allgemeines

Aufbauend auf der Betrachtung der Ausgangssituation (Abschnitt 1.1, S. 1 ff.) wurde im Abschnitt 3.4 (S. 51 ff.) als notwendiges Handlungsfeld die situationsorientierte Werkerführung abgeleitet. In diesem Kapitel sollen nun die Anforderungen an eine Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für letztere ermittelt werden. Diese bilden die Grundlage für das in Kapitel 5 zu entwickelnde Konzept.

4.2 Informationstechnische Assistenz in der manuellen Montage

4.2.1 Grundlegender Bedarf der Informationsbereitstellung

Alle Bereiche von Montagesystemen unterliegen einem ständigen Trend zur Reorganisation. Ziel ist es häufig, dezentrale, prozessorientierte und teilautonome Verantwortungsbereiche und -strukturen zu schaffen (ZAEH et al. 2009). Mitarbeiter der operativen Ebene werden dann oftmals in dezentralen Organisationsstrukturen mit neuen Aufgaben konfrontiert. Zusätzlich zu den unmittelbar produktiven Tätigkeiten werden der Einsatz in der Disposition und in der Koordination von Aufgaben und Aufträgen sowie die kontinuierliche Weiterentwicklung und Verbesserung der eigenen Arbeitsabläufe, der Ergebnisse und der Produktivität verlangt (SPATH & GERLACH 2003).

Die Beteiligung des Mitarbeiters an Entscheidungen und die Notwendigkeit seines unternehmerischen Denkens stehen zunehmend im Fokus der Diskussionen. Für die Sicherung der Wirtschaftlichkeit und Wettbewerbsfähigkeit durch die Integration der Mitarbeiter in den Montageprozess müssen daher eine höhere operative Prozessverantwortung, die Einbindung in den Planungsprozess, benutzerfreundliche Mensch-Technik-Schnittstellen, Maßnahmen zur Fehlervermeidung, die Qualitätssicherung und die kontinuierliche Lernförderlichkeit sowie umfassende Information und Kommunikation berücksichtigt werden (SLAMA 2004).

Zudem ist die Einzel- und Kleinserienfertigung durch eine Vielfalt an schwer formalisierbaren Einzelaufgaben charakterisiert. Diese sind meist von höherer Komplexität als Routineaufgaben und damit nur schwer plan- und strukturierbar oder durch konventionelle Planungswerkzeuge zu erfassen (BÖHL 2001). Das notwendige Prozess- und Ausführungswissen trägt der Mitarbeiter. Das System zur Informationsbereitstellung muss jedoch der Einbeziehung der daraus resultierenden Handlungen Rechnung tragen.

Ein grundlegendes Ziel der Anwendung eines Montageassistenzsystems ist die Reduktion und die Vermeidung von menschlichen Fehlern im Verlauf der Montagetätigkeit. Die möglichen Montagefehler können hierbei in die Klassen der Ausführungs-, Gedächtnis- und Denkfehler unterteilt werden (REASON 1994). Eine Überlastung des Mitarbeiters, Konzentrationsschwächen oder eine Nachlässigkeit haben Ausführungsfehler zur Folge. Dabei kann Nachlässigkeit in vielen Fällen auf eine Form der Unterforderung zurückgeführt werden. Ausführungsfehler können ebenso wie Gedächtnisfehler, bei denen es sich primär um das Auslassen von Handlungsschritten handelt, durch eine geeignete Gestaltung des Arbeitsprozesses reduziert werden. Denkfehler treten vor allem bei kognitiv anspruchsvollen Tätigkeiten auf, welche die Erinnerung an vorgegebene Abläufe oder die Lösung von bislang unbekannten Problemen fordern (z. B. Beherrschung einer hohen Variantenzahl, komplexe Aufgaben in der Montage und in der Qualitätsprüfung). Während Ausführungs- und Gedächtnisfehler durch eine geeignete Auslegung des Montageprozesses reduziert werden können, sind Denkfehler schwieriger zu vermeiden. Die Ursachen für diese Fehlerklasse liegen häufig in einer unzureichenden Qualifikation des Mitarbeiters sowie in einer mangelnden Verfügbarkeit, Aktualität (auch Situationsorientierung) oder Vollständigkeit der Informationen (KRÜGER et al. 1998).

Situationsorientierte Montageassistenzsysteme können zur Reduzierung von qualifikations- und informationsbedingten Fehlern, zur Verbesserung der Prozessfähigkeit und somit zur Steigerung der Effizienz in der Montage beitragen. Dies wird durch das Bereitstellen von Arbeitsanweisungen und Arbeitsabläufen, die Vermittlung von Prozesskenntnissen sowie die Dokumentation von Erfahrungswissen erreicht. Ferner ist die strukturelle Aufbereitung der Arbeitsanweisungen im Rahmen von situationsorientierten Arbeitsabläufen notwendig.

4.2.2 Studie zur adaptiven und situationsorientierten Führung in der manuellen Montage

4.2.2.1 Vorgehen und Gegenstand der Studie

In dem voran gegangenen Kapitel wurde dargelegt, dass die geringe Einbeziehung der Situation und der Montageumgebung in den grundlegenden Verfahren der Montageplanung ein Defizit bestehender Ansätze zur Werkerassistenz bildet. Ausgehend davon und im Hinblick auf die Anwendbarkeit des zu erarbeitenden Konzeptes ist zu bestimmen, inwiefern und mit welchen Verfahren Unternehmen dem Bedarf an informationstechnischer Integration von Mitarbeitern, Prozess und Ressourcen des montagespezifischen Kontextes heute gerecht werden und welche weiterführenden Bedarfe einzubeziehen sind. Die vom Verfasser über einen Zeitraum von zwölf Monaten durchgeführte Studie „Adaptive und situationsorientierte Führung in der manuellen Montage“ bezog anhand eines Fragenkatalogs sowohl die aktuelle Situation der Unternehmen als auch die Planung und die Bewertung zukünftiger Verfahren und Technologien mit ein. Dabei bildete die Befragung zum Unternehmensprofil und zu den Produkten den Rahmen für die Einordnung der Resultate in den weiteren Abschnitten der Studie (vgl. Abbildung 21). Die Umfrage fand mit organisatorischer Unterstützung des VTT Technical Research Centre of Finland, Helsinki, Finnland statt und wurde webbasiert in deutscher, englischer und finnischer Sprache angeboten.

Einordnungsrahmen der Befragung

- Abschnitt 1: Unternehmensprofil
  Fragen zu u.a. Branchenzugehörigkeit, Produktionsstandorten, Anzahl der Angestellten
- Abschnitt 2: Angaben zu Produkten und zur Montage
  Fragen zu u.a. Anzahl Produktfamilien, Varianten, Gestaltungsmöglichkeiten

Bestehende und geplante Verfahren und Systeme

- Abschnitt 3: Gestaltung der manuellen Montage
  Fragen zu u.a. Montagestrukturen, Training, Einarbeitungszeiten
- Abschnitt 4: Darstellung von Montageanweisungen
  Fragen zu u.a. Darstellungsmitteln, Gestaltungselementen, Interaktion
- Abschnitt 5: Speicherung und Struktur von Montageanleitungen
  Fragen zu u.a. Änderungskompetenz, Vorgaben, Datenstrukturen

Konzepte und Entwicklungen

- Abschnitt 6: Zukünftige Systeme der Mitarbeiterführung
  Wertung von Eigenschaften und Funktionalitäten zukünftiger Assistenzsysteme

Abbildung 21: Gliederung des Fragenkatalogs der Studie „Adaptive und situationsorientierte Führung in der manuellen Montage“

4.2.2.2 Struktur der befragten Unternehmen

Im Rahmen der Studie beteiligten sich 40 Unternehmen. In der Analyse der Ergebnisse werden die befragten 47 unterschiedlichen Standorte individuell erfasst (Abschnitt 4.2.2.3, Abschnitt 4.2.2.4). Unbeantwortete Einzelfragen gehen nicht in die Bewertung ein. Auf Basis der erhaltenen Antworten konnten die Unternehmen Branchen nach NACE Rev. 2 (2008) zugeordnet werden. Die NACE ist die europäische Standardsystematik produktiver Wirtschaftstätigkeiten. Sie stellt die Gesamtheit der Wirtschaftstätigkeiten in einer Untergliederung dar, welche die Zuordnung eines NACE-Codes zu dem ausführenden Unternehmen ermöglicht. Die Umfrage bei produzierenden Unternehmen wurde auf die Auswahl der in Tabelle 5 detaillierten Abteilungen (Branchen) beschränkt.

Tabelle 5: Beschreibung der in der Befragung zur Auswahl stehenden Abteilungen (Branchen) nach NACE Rev. 2 (2008)

Abteilung	Beschreibung der Abteilung
C1-C24	Verarbeitendes Gewerbe und Herstellung von Waren außer C25-C32
C25	Herstellung von Metallerzeugnissen
C26	Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen
C27	Herstellung von elektrischen Ausrüstungen
C28	Maschinenbau
C29	Herstellung von Kraftwagen und Kraftwagenteilen
C30	Sonstiger Fahrzeugbau
C31	Herstellung von Möbeln
C32	Herstellung von sonstigen Waren

Durch eine Streuung der Befragung über unterschiedliche Branchen und eine Differenzierung nach den Bereichen der Produktion mit der vorwiegenden Wertschöpfung innerhalb der Unternehmen wurde ein aussagekräftiges und branchenunabhängiges Bild ermittelt (siehe Abbildung 22). Ein Anteil von 42,5 % der Unternehmen aus den Branchen Maschinenbau und Herstellung von Metallerzeugnissen an der Befragung verdeutlicht die Signifikanz der Ergebnisse für den Wirtschaftsstandort Deutschland. Unternehmen mit vorwiegender Erzeugung des produktionsorientierten Mehrwerts in Montage oder Montage und Fertigung vertreten einen Anteil von 72,5 % der ausgefüllten und gültigen Fragebögen. Die Wertschöpfungsanteile aus anderen Unternehmensbereichen wurden nicht explizit genannt.

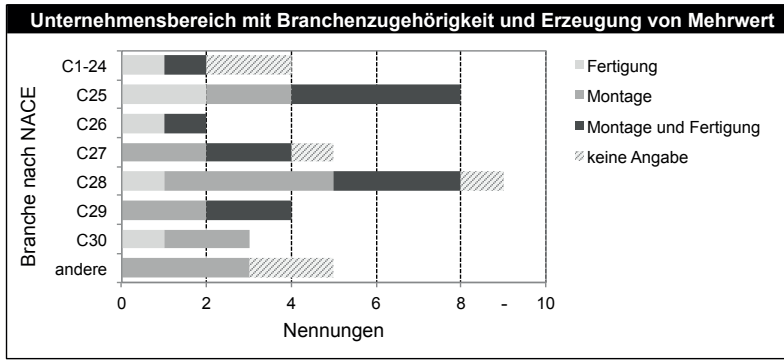


Abbildung 22: Branchenzugehörigkeit der Standorte und Produktionsbereich mit der vorwiegenden Erzeugung des Mehrwerts der befragten Unternehmen (Branchen vgl. Tabelle 5)

Die Größe der befragten Unternehmen nach Anzahl der Mitarbeiter ist in Abbildung 23 (links) aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass die Verteilung der Unternehmen nach Anzahl der Mitarbeiter annähernd gleich über die angebotenen Größenklassen ist. Die Frage nach der Anzahl der Mitarbeiter in Fertigung und Montage verschob diese Verteilung in Richtung von Klassen mit weniger Mitarbeitern.

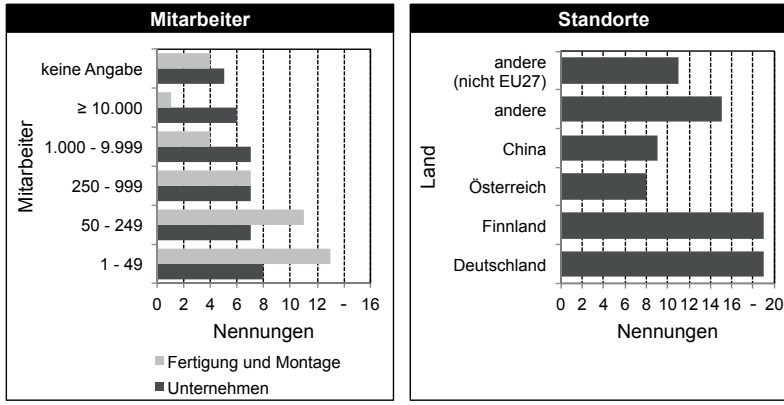


Abbildung 23: Anzahl der Beschäftigten und Standorte der befragten Unternehmen

Aufgrund des Ursprungs der Befragung in Deutschland und Finnland wurde das Ergebnis hinsichtlich der Standorte der Unternehmen beeinflusst. Eine Mehrzahl der Unternehmen ist an Standorten in diesen beiden Ländern vertreten (siehe Abbildung 23, rechts). Jedes befragte Unternehmen ist mindestens in einem der beiden Länder mit einem Standort präsent.

Eine Betrachtung der Struktur der Unternehmen in Fertigung und/oder Montage verdeutlicht, dass vorherrschend auf Fachkräfte zurückgegriffen wird. Eine Ausnahme bilden Unternehmen mit 250 - 999 Mitarbeitern in diesem Bereich (siehe Abbildung 24, links). Eine differenzierte Analyse hinsichtlich der Qualifikation der Mitarbeiter in den von den Unternehmen angegebenen Bereichen mit der höchsten Wertschöpfung zeigt, dass davon unabhängig mehrheitlich Fachkräfte beschäftigt werden (siehe Abbildung 24, rechts). Dies deutet auf das heute schon hohe Qualifikationsniveau der Beschäftigten hin. Zudem legt die Analyse nahe, dass jenes Niveau aus der Erkenntnis der Unternehmen resultiert, nur mit hinreichend qualifizierten Belegschaften die notwendige Flexibilität zur Herstellung komplexer und kundenorientierter Produkte gewährleisten zu können. Abschnitt 1.1 (S. 1 ff.) enthält weitere Ausführungen hierzu. Die Vervollständigung dieser Argumentation bedingt eine Untersuchung der Produktstruktur der befragten Unternehmen, welche im folgenden Abschnitt dargestellt ist.

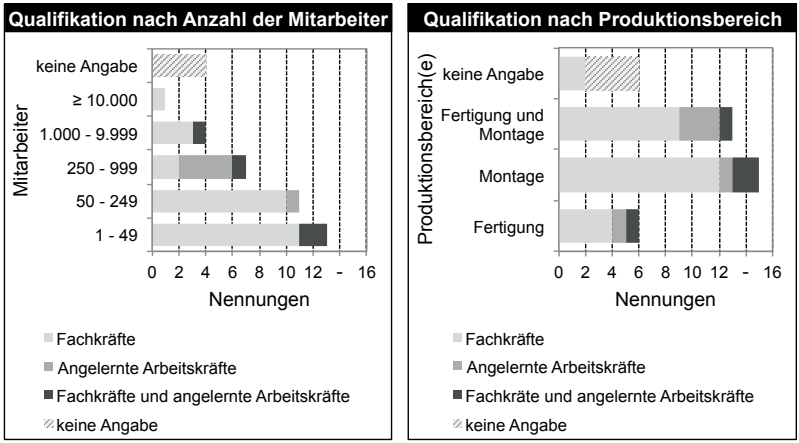


Abbildung 24: Ergebnisse der Befragung zur Qualifikation der Arbeitskräfte

4.2.2.3 Produktstruktur der untersuchten Unternehmen

Die befragten Unternehmen gaben zu 86,4 % an, dass in den vergangenen fünf Jahren ein Trend zu einer steigenden Anzahl an Produktvarianten erkennbar war. In weniger als 10 % der Interviews wurde geantwortet, dass die Anzahl der Varianten gesunken ist. Unterstrichen wird diese Aussage durch die Angabe der zu fertigenden Losgröße von weniger als durchschnittlich 10 Stück in 78 % der befragten Unternehmen. 29,3 % der Unternehmen erklärten, dass in der Regel Einzelstücke gefertigt oder montiert werden (siehe Abbildung 25, links).

In mehr als der Hälfte der Nennungen gaben die Befragten an, dass der durchschnittliche Lebenszyklus der gefertigten Produkte mehr als sechs Jahre beträgt. In der Automobilindustrie hat sich der durchschnittliche Produktlebenszyklus von ca. 11 Jahren in den 1980er Jahren auf durchschnittlich sechs Jahre in den 2000ern nahezu halbiert (ROMBERG & HAAS 2005). Die Betrachtung der durchschnittlichen Lebenszyklen zeigt, dass die vorwiegende Fertigung in kleinen Losgrößen mit einem zeitlich langen Lebenszyklus der Produkte korrespondiert (siehe Abbildung 25, rechts). Dies legt nahe, dass die kundenindividuelle Produktgestaltung auf der Grundlage von Basisprodukten stark ausgeprägt ist. Eine im Rahmen der Studie durchgeführte Analyse dieser Gestaltungsdimensionen bestätigt diese Aussage (siehe Abbildung 27, S. 63).

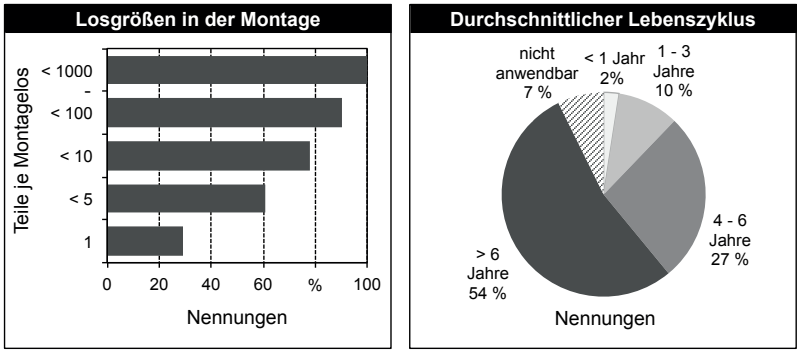


Abbildung 25: Ergebnisse der Befragung zur durchschnittlichen Losgröße in der Montage und zum durchschnittlichem Lebenszyklus der gefertigten Produkte

Die starke Ausprägung der kundenindividuellen Produktgestaltung wird durch die Auswertung der Befragung zu der Anzahl an Produktfamilien und zu der Anzahl an Produktvarianten unterstrichen (vgl. Abbildung 26). Das Ergebnis verdeutlicht die große Anzahl der angebotenen Produktfamilien bei einer gleichzeitig starken Variantenvielfalt. Diese Kombination verweist auf den Aspekt des Faktors Wissen als Grundlage für die flexible Einsetzbarkeit eines Werkers in einem variantenreichen Montageumfeld.

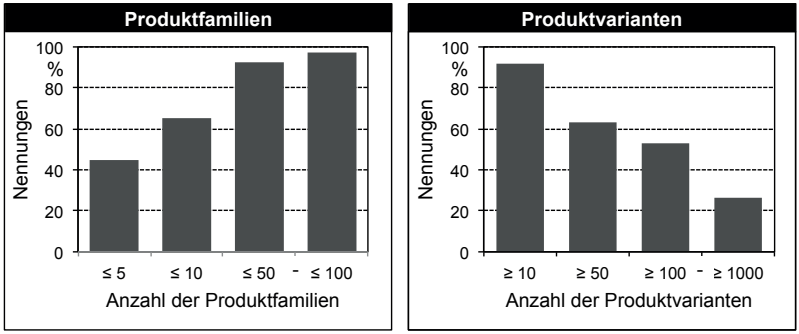


Abbildung 26: Ergebnisse der Befragung zur Anzahl an Produktfamilien und der Anzahl an Produktvarianten

Im Sinne dieser Gestaltungsdimensionen kann zwischen innerer und äußerer Vielfalt an Produktvarianten unterschieden werden (BARTUSCHAT 1995). Dabei ist das generelle Ziel des Variantenmanagements die Minimierung der inneren (internen) Vielfalt bei der Bereitstellung einer vom Kunden erwarteten äußeren (externen) Vielfalt (FIRCHAU et al. 2002). Die äußere Vielfalt repräsentiert die Angebotsvielfalt eines Produkts gegenüber dem Kunden. Dies beinhaltet die durch den Kunden beeinflussbaren Eigenschaften des Produkts und resultiert in marktseitig differenzierbaren Varianten. Im Gegensatz dazu beschreibt die innere Vielfalt die Diversität an Bauteilen und -gruppen, welche im Rahmen der Auftragsabwicklung und Herstellung benötigt werden. Die Optimierung der äußeren Variantenvielfalt hinsichtlich Kosten-Nutzen-Überlegungen und marktstrategischen Überlegungen bei gleichzeitiger Minimierung der inneren Variantenvielfalt sollte das Ziel bei der Entwicklung von variantenreichen Produkten sein (FIRCHAU et al. 2002, BONGULIELMI 2003). Die Beherrschung der inhärenten inneren Vielfalt durch den Werker kann von Unternehmen mit Hilfe einer entsprechenden Gestaltung der Assistenzsysteme unterstützt werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Befragung folgte hinsichtlich der Gestaltungdimensionen einem kundenorientierten Ansatz mit Bezug auf die äußere Vielfalt. Der Anteil der Nennungen der Gestaltungsdimensionen

- Farbe und/oder Oberfläche,
- Form (Teile),
- Produktmodule,
- Material und
- strukturunabhängige Elemente

überstieg jeweils 50 % (Abbildung 27, links). Dies korrespondiert mit der Tatsache, dass mehr als 60 % der Unternehmen ihren Kunden anbieten, vier oder mehr Gestaltungdimensionen des Produkts zu beeinflussen (Abbildung 27, rechts).

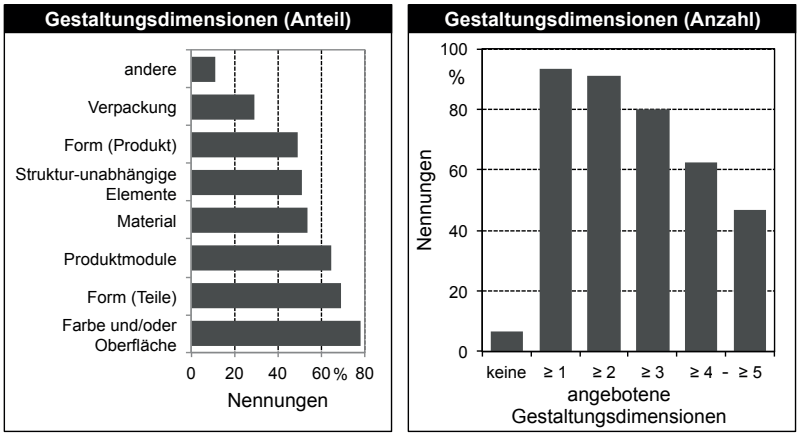


Abbildung 27: Ergebnisse der Befragung zur Anzahl der Dimensionen kundenindividueller Produktgestaltung

Sowohl die hohe Anzahl angebotener Gestaltungdimensionen als auch die steigenden Anzahl an Produktvarianten erfordern eine Erweiterung der Werkerunterstützung hin zu situationsorientierten Inhalten und einer multimedial adäquaten Darstellung. Hinsichtlich der Gestaltung letzterer erlaubt die Studie Rückschlüsse bezogen auf den Zeitpunkt der Befragung und die Planung der Unternehmen in den darauf folgenden drei Jahren (siehe folgender Abschnitt).

4.2.2.4 Anweisungen und Assistenz in der Montage

Die Unternehmen wurden im nächsten Schritt zu den heute eingesetzten und zukünftig geplanten (multimedialen) Gestaltungselementen im Rahmen der Montageassistenz befragt (siehe Abbildung 28). Es ist zu erkennen, dass die vorwiegenden Gestaltungselemente (> 70 % der Nennungen) traditionell ausgerichtet sind:

- Text (74,5 %)
- Tabellen/Listen (70,2 %)
- Zeichnungen (74,5 %)

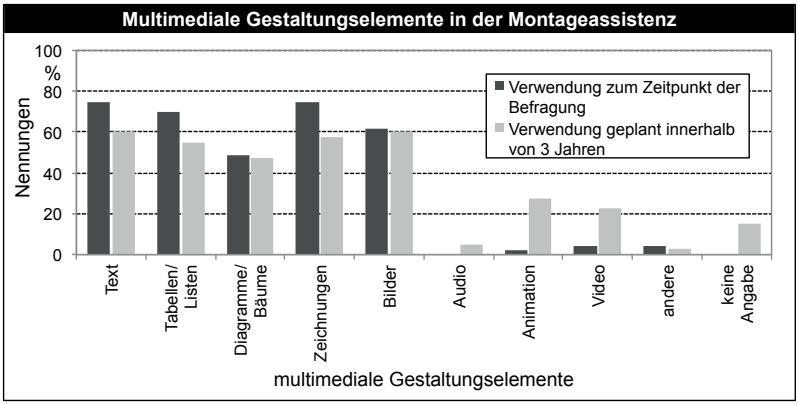


Abbildung 28: Ergebnisse der Befragung zu den in Montageanweisungen eingesetzten multimedialen Gestaltungselementen

Ausgehend von dem Zeitpunkt der Befragung plant ein hervorzuhebender Anteil der Unternehmen innerhalb von drei Jahren eine Reduzierung der traditionellen Gestaltungselemente:

- Text (- 14,5 %)
- Tabellen/Listen (- 15,2 %)
- Zeichnungen (- 17,0 %)

Die Anweisungsgestaltung wird sich dabei zu hin Animation und Video verschieben.

Im abschließenden Abschnitt des Fragenkatalogs der Studie „Adaptive und situationsorientierte Führung in der manuellen Montage“ sollte der Standpunkt der befragten Unternehmen zu zukünftigen Systemen der Mitarbeiterführung erfasst werden. Es wurden Aussagen zu Eigenschaften und Funktionalitäten solcher Systeme erbeten. Die zur Auswahl angebotenen Wertungen waren *wichtig*, *optional/gewünscht*, *nicht wichtig* und *Ablehnung*. Die Wertung von einer oder mehreren Eigenschaften bzw. Funktionalitäten konnte unbeantwortet bleiben.

Die Auswertungen zu den übergeordneten Zielen des Einsatzes von Assistenzsystemen, wie

- Reduzierung von Anlernzeiten,
- Reduzierung von Suchzeiten,
- Verbesserung der Ergonomie und
- Reduzierung von Montagefehlern

zeigt, dass diese jeweils mit über 50 % der Wertungen als wichtig angesehen werden. Mit Ausnahme des erstgenannten Ziels werden die übergeordneten Ziele mit über 80 % der Wertungen als wichtig oder optional/gewünscht eingeordnet. Dies verdeutlicht den aus der Produkt- und Variantenstruktur erkennbaren Bedarf der Unternehmen. Die übergeordneten Ziele unterstützend, sind auf Basis der Befragung folgende Funktionen von Assistenzsystemen als wichtig oder optional/gewünscht hervorzuheben (Anteil der Anzahl Nennungen je Funktion jeweils über 80 %):

- Mitarbeiteridentifikation (z. B. zur Anpassung des Arbeitsplatzes)
- Speicherung und Anwendung von Mitarbeiterprofilen
- Werkstücklokalisierung
- Erkennung des Montagefortschritts des Werkstücks
- Erkennung von Montagefehlern
- Reaktion auf Montagefehler

Die Forderung nach den oben genannten Funktionen wird durch die folgenden Merkmale hinsichtlich der Ableitung der Montagesequenz (Anteil der Anzahl Nennungen je Merkmal jeweils über 66 %) unterstützt:

- Automatische Anpassung der Ausgabe unter Berücksichtigung der Bauteilverfügbarkeit
- Automatische Anpassung an Werkzeugverfügbarkeit
- Erkennung der Montagereihenfolge des Werkers
- Automatische Anpassung an gewählte Montagereihenfolge
- Darstellungsunabhängigkeit

4.2.3 Arbeitswissenschaftliche Aspekte der Werkerunterstützung

Die Ergebnisanalyse der Studie „Adaptive und situationsorientierte Führung in der manuellen Montage“ legt nahe, dass arbeitswissenschaftliche Aspekte für Dialoge zwischen Mensch und Assistenzsystemen im produktionstechnischen Umfeld von besonderer Bedeutung sind. Die offenkundigen Kernaspekte eines sog. „guten Dialoges“ spiegeln sich in den Aussagen der befragten Unternehmen wider. Sie prägen die generell gültigen Rahmenbedingungen einer Interaktion mit einem System und sollen als Leitlinien für die Entwicklung der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung gelten. Diese Leitlinien können nach der Norm DIN EN ISO 9241-110 (2008) im Sinne der Erfüllung von

- Aufgabenangemessenheit,
- Selbstbeschreibungsfähigkeit,
- Steuerbarkeit,
- Erwartungskonformität,
- Fehlertoleranz,
- Individualisierbarkeit und
- Lernförderlichkeit

beschrieben werden.

Die *Aufgabenangemessenheit* ist ein herauszustellendes Merkmal im Sinne der in Abbildung 2 (S. 3) gegenübergestellten Eigenschaften von Werker und Assistenzsystem. Sie trägt zur Gestaltung eines prozessorientierten Ablaufes bei, wel-

cher den Informationsbedarf des Werkers beachtet und erweiterte Informationen nur über explizite Hilfefunktionen anbietet. Neben der inhaltlich differenzierten Rückmeldung des Systems in Abhängigkeit des individuellen Kenntnisstandes des Werkers bedingt die *Selbstbeschreibungsfähigkeit* eine Abstimmung von Darstellung und zu erwartender Reaktion des Systems. Ferner verlangt der Werker eine *Steuerbarkeit*, welche beinhaltet, dass Art (z. B. Wahl des Eingabemediums) und Umfang (z. B. Möglichkeit einer alternativen Vorgehensweise) der Kontrolle über das Gesamtsystem und die Abfolge der Montageoperationen erhalten bleiben. Die *Erwartungskonformität* als Entsprechung der Systemvorstellung des Werkers mit dem Verhalten und der zugrunde liegenden Struktur ist stark von der tatsächlichen Erwartungshaltung des Werkers gegenüber dem System abhängig. Sie wird positiv durch die Einbringung von einheitlichen Gestaltungselementen im Detail und auf Systemebene sowie durch deren kompatible Darstellung beeinflusst. Eine Gestaltung unter Beachtung der *Fehlertoleranz* bezieht implizit das natürliche Verhalten des Werkers im Hinblick auf seine Tätigkeit mit ein. Eine daraus resultierende Interaktion von System und Werker akzeptiert auch offensichtlich fehlerbehaftetes Verhalten. Die Erfüllung der Anforderung an die Selbstbeschreibungsfähigkeit (siehe oben) beeinflusst die Fehlerprävention positiv. Die *Individualisierbarkeit* eines Systems wird durch die Anpassung der Dialoge und der Arbeitsabläufe an einen einzelnen Werker oder eine Werkergruppe erfüllt. Es ist eine Abwägung hinsichtlich des administrativen Aufwands und der persönlichen Spezialisierung zu treffen. Eine explizite oder immanente lernförderliche Gestaltung des Systems und die Ausrichtung der zugrunde liegenden Struktur unterstützt sowohl im Detail als auch im Ganzen die kontinuierliche Befähigung des Werkers. Die Umsetzung ist in einer angemessenen Lernstrategie dem produktionstechnischen Umfeld anzupassen.

4.3 Zieldimensionen

Ausgehend von den Ergebnissen der Studie und den arbeitswissenschaftlichen Aspekten gilt es zunächst, die primären Zieldimensionen für die situationsorientierte Werkerführung in der Montage zu klären. Diese legen den Rahmen für die Eignung der Repräsentation von Montagesequenzen fest. Der Bereich der manuellen Montage, als Schwerpunkt dieser Arbeit, verlangt nach einer Betrachtung des Konzepts in Bezug auf die Mensch-System-Interaktion nach der entsprechenden Norm DIN EN ISO 9241-11 (1999). Diese definiert hierzu den Begriff der Usability („Gebrauchstauglichkeit“ bzw. „Benutzerfreundlichkeit“) als den

Grad, in welchem ein technisches System effektiv, effizient und zufriedenstellend verwendet werden kann. In diesen drei Zieldimensionen soll die vorliegende Arbeit mit der zu entwickelnden Struktur für Montagesequenzen zu einer Ermöglichung der situationsorientierten Werkerführung beitragen:

- *Effektivität* bedeutet hierbei, in welchem Umfang und wie genau ein Werker (Benutzer) die ihm verantworteten Arbeitsinhalte in der Montage erfüllen kann.
- Die *Effizienz* bemisst sich an dem zeitlichen Aufwand, der zur Erzeugung der Arbeitsanweisungen auf Basis der entwickelten Repräsentation von Montagesequenzen notwendig ist.
- Die *Zufriedenheit* des Werkers trägt maßgeblich zur Akzeptanz des Systems bei. Einflussfaktoren sind die ergonomische Gestaltung, insbesondere die Vermeidung erhöhter mentaler Belastungen sowie eine hohe Robustheit und Flexibilität des Führungsverhaltens.

Eine neuartige Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung sollte, im Vergleich zu bekannten Strukturen und Anweisungsverkettungen, eine wesentliche Steigerung der Bewertung in Bezug auf diese drei Kriterien erzielen. Bezogen auf eine praxisnahe Bewertung der zu entwickelnden Struktur soll kein einzelnes Zielkriterium gemindert sein.

4.4 Anforderungsstruktur

Um die geforderten Zieldimensionen umfassend und geeignet zu erfassen, ist es notwendig, die Anforderungen an die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen vollständig zu klären. Entsprechend der Ausgangssituation dieser Arbeit bezieht die angestrebte Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung den Menschen, seine Umgebung und den vorliegenden Montageprozess unmittelbar in die Interaktion mit dem System und mittelbar in die Bestimmung der Montagesequenz ein.

Hierfür ist eine kontextbezogene Betrachtung des Systems und der interagierenden Elemente zweckmäßig. Der *Nutzungskontext* eines Systems beinhaltet in Anlehnung an die Norm DIN EN ISO 9241-11 (1999) folgende Aspekte:

- Produktionsumgebung (physikalische, technische und soziale *Umgebung*);

- Werkzeuge und Hilfsmittel (*Arbeitsmittel*);
- Werker (*Benutzer*);
- deren Aufgaben, Ziele, Wissen und Fähigkeiten (*Arbeitsaufgabe*);

Dem gegenüber steht die in der Literatur gebräuchliche Unterscheidung des Kontextbegriffs in vier Dimensionen (DIX et al. 2000, RAPTIS et al. 2005, ROTH 2005). Der *Infrastrukturkontext* charakterisiert hierbei die Kommunikationsinfrastruktur des Systems und bezeichnet sowohl die internen als auch die externen Kanäle. Der *Systemkontext* bezieht sich auf die weiteren Systemkomponenten, die dem Betrieb des Gesamtsystems der Werkerführung zu Grunde liegen. Der *Domänenkontext* stellt die Beziehung zwischen den Arbeitsmitteln und den Werkern auf Basis der Anwendungsdomäne (hier: Montage) her. Darunter fällt auch die Interaktion mit weiteren Systemen der Produktionsumgebung und anderen Werkern. Der *physikalische Kontext* berücksichtigt die physikalischen Charakteristika von Geräten und deren Einsatzbedingungen. Beispiele sind die Größe und die Beschaffenheit von Werkzeugen sowie die notwendigen Sensor- bzw. Erkennertechnologien. Diese vier Dimensionen ergänzen sich, stehen in Interaktion zueinander und lassen sich teilweise nur schwer voneinander abgrenzen, was DIX et al. (2000) folglich als *Context in Context* bezeichnen.

Es ist deutlich, dass der Kontext im Verlauf einer Montagetätigkeit kein statisches Phänomen, sondern ein dynamischer Prozess ist (BEALE & LONSDALE 2004). Der Kontext ist nicht ein Zustand, sondern ein Teil des (Kommunikations-)Prozesses (COUTAZ et al. 2005). Der Kontext ist die Gesamtheit aller Informationen, die zur Charakterisierung der Situation einer Entität benutzt werden können. Eine *Entität* ist eine Person, ein Ort oder ein Objekt, welches als in der Interaktion zwischen einem Benutzer und einer Anwendung relevant angesehen wird (ABOWD et al. 1999). Der Zusammenhang zwischen den Begriffen ist in Abbildung 29 dargestellt. Demnach ist ein Kontext das Zusammenspiel von Umgebung, Werker, Arbeitsaufgabe und Produkt.

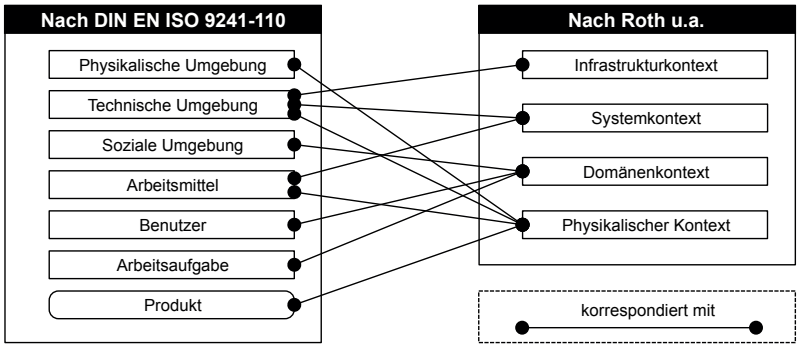


Abbildung 29: Aspekte und Zusammenhang der Kontextbegriffe

Der Werker, die Produktionsumgebung, der Montageprozess und die Werkzeuge können im Sinne von Kontext als ein Gesamtsystem betrachtet werden. Die Teilelemente dieses Systems verweisen aufeinander und beeinflussen sich gegenseitig. Gleichzeitig wird die Funktion und die resultierende Ausgabe des Systems nicht durch einzelne, technische oder menschliche Elemente bestimmt, sondern sie ergibt sich aus der Interaktion zwischen diesen. Abbildung 30 zeigt die Werkerführung als kontextorientiertes System. Der Zusammenhang zwischen den adressierten Aspekten der Usability und den sich ergebenden Anforderungen an die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung wird dargestellt. Diese Anforderungen werden im folgenden Abschnitt ausgeführt, wobei konzeptionelle, technische und benutzerorientierte Anforderungen unterschieden werden.

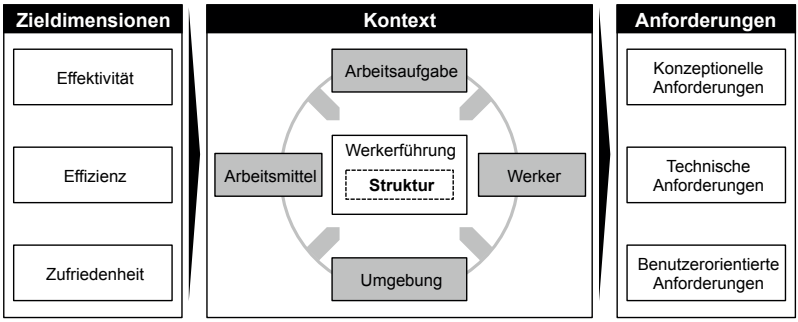


Abbildung 30: Zieldimensionen, Kontext und Anforderungen an eine Struktur zur Werkerführung

4.5 Konzeptionelle Anforderungen

Die Zielsetzung des Konzepts einer Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen in einer situationsorientierten Werkerführung muss es sein, den Bedarf des individuellen Werkers nach Flexibilität bei einer hohen Effizienz des Montageprozesses zu erfüllen. Die Defizite bestehender Ansätze sind durch die unmittelbare und zeitnahe Berücksichtigung von Produkt, Prozess und Ressource in der Werkerführung zu reduzieren. Diese Defizite sind zum einen ablaufbedingt (abgeleitet aus der Montagesequenz) und zum anderen aufmerksamkeitsbedingt (abgeleitet aus der Informationsverarbeitung durch den Werker). Wie aus der Betrachtung zum Stand der Erkenntnisse hervorgeht, weisen bestehende Ansätze in der Literatur Potenzial im Sinne einer individuellen, belastungsgerechten Auslegung des Informationsflusses zwischen System und Werker auf. Gerade bei der Montage von komplexen Produkten hat diese aber einen signifikanten Stellenwert.

Die zu erarbeitende Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung soll im Sinne einer hohen Übertragbarkeit weitgehend generisch definiert werden. Dementsprechend müssen bestimmende Charakteristika von Montageprozessen möglichst umfassend berücksichtigt und in der Struktur abgebildet werden können. Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Konzepte und Strukturen sind außerdem auf eine Anwendbarkeit in anderen Bereichen der Produktionstechnik zu prüfen.

Eines der hervorzuhebenden Potenziale der situationsorientierten Werkerführung besteht in der Reduzierung von aufmerksamkeitsbedingten Qualitätsdefiziten. Hierbei gilt es zu identifizieren, wie durch die Adaptierung des Montageablaufs an den aktuellen Produktzustand die Such- und Wartezeiten im Verlauf der Montage reduziert werden können. Dies führt unmittelbar zu einer verstärkten Aufmerksamkeit des Werkers auf die tatsächlichen Montagetätigkeiten. Es müssen dafür geeignete Mechanismen und Strukturen zur Generierung der kontext- und situationsgerechten Anweisungsinformationen erarbeitet werden, welche ohne erheblichen Aufwand in arbeitswissenschaftlich adäquaten Dialogen verwendet werden können.

Neben der Erweiterung der Freiräume des Werkers in der Montage ist die Erhaltung der Effizienz der ermittelten Montagesequenz eine notwendige Randbedingung. Eine Nichteinhaltung würde die Relevanz bezüglich der Wirtschaftlichkeit und der arbeitswissenschaftlichen Sinnfälligkeit in Frage stellen.

4.6 Technische Anforderungen

Anforderungen an das Datenformat und den Datenaustausch

Die grundlegenden Eingangsinformationen für die Werkerführung sind Montagevorranggraphen mit den zugehörigen Anweisungselementen. Diese sind in ein Datenformat zu überführen, welches die logische Gliederung und Abfolge der Elemente des Montagevorranggraphen erhält. Die Möglichkeit der Anpassung des Informationsgehalts je erzeugter Anweisung erfordert, dass eine Konvertierung aller Anweisungsinformationen auf den höchsten Detaillierungsgrad stattfinden muss, insofern dieser noch nicht vorliegt. Im Bezug auf zukünftige Herausforderungen ist eine offene und erweiterbare Gestaltung des Datenformats notwendig, welche die Abbildung von allen Elementen des Montageprozesses auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen erlaubt. An den Export der grundlegenden Daten sind keine besonderen Anforderungen zu stellen, da innerhalb eines Systems zur Werkerführung keine Änderungen an der Struktur des Montagevorranggraphen vorgenommen werden sollen. Auf Basis der Struktur erzeugte Anweisungen sollen dergestalt sein, dass die enthaltene Information multimodal angepasst und ausgegeben werden kann. Hinsichtlich der angestrebten Einbeziehung der Produktionsumgebung in den Vorgang der Erzeugung von Montageanweisungen soll die Struktur auf bestehenden und anerkannten Modellen aufbauen sowie die Hauptklassen *Produkt*, *Prozess* und *Ressource* abbilden.

Anforderungen an die Integration der Produktionsumgebung

Die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen und der darauf operierende Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Sequenz müssen Einflussfaktoren, die für die Ausführung der Montagetätigkeit relevant sind, einbeziehen. Dies bedeutet, dass die zu entwickelnde Struktur eine Einbeziehung der Produktionsumgebung hinsichtlich

- Montagefortschritt (des Werkstücks),
- Verzögerungen des Montageverlaufs,
- Ausführbarkeit von Teilen der Montage und
- Anpassung der Montagesequenz

ermöglichen muss. Entsprechende funktionale Anforderungen werden an den Algorithmus zur Bestimmung der situationsorientierten Montagesequenz gestellt.

Anforderungen an die Integration des Werkers

Der Werker ist sowohl Empfänger als auch Sender der für die Bestimmung der Montagesequenz notwendigen Informationen. Bezüglich der Rolle als Sender ist zu erreichen, dass die zu entwickelnde Struktur die Beeinflussung der Montagesequenz durch explizite und implizite Eingaben des Werkers hinsichtlich Bereitschaft, Montagefortschritt und Detaillierung der angebotenen Anweisungen gewährleisten kann. In der Umsetzung bedeutet dies die Achtung der benutzerorientierten Anforderungen (siehe Abschnitt 4.7, S. 74 ff.).

Anforderungen an die Systemergonomie

Im Rahmen der technischen Realisierung des Systems ist neben einer einfachen und benutzerorientierten Interaktion (siehe Abschnitt 4.7, S. 74 ff.) auch auf die maximale gesundheitliche Verträglichkeit zu achten. Darunter fällt eine geringe kognitive Belastung des Werkers, was durch eine situationsorientierte Führung und eine angepasste Detaillierung der Anweisungen und durch die Anpassung der grundlegenden Anweisungsinformationen an die zur Verfügung stehenden Ausgabemedien (auch: geringe visuelle Belastung) möglich ist.

Anforderungen an die Performanz

Die Performanz eines Systems zur Werkerführung wird maßgeblich durch die zugrundeliegende Struktur der Montagesequenzen bestimmt. Hierbei ist auf der einen Seite die Performanz bei der Erzeugung der Struktur und auf der anderen Seite die Performanz bei der Ermittlung der auszugebenden Anweisungsinformation zu betrachten. Die Erzeugung der Struktur findet im Zuge der Montageplanung statt, ist also keine in Echtzeit auszuführende Aktivität. Die hinreichende Performanz bei der Ermittlung der auszugebenden Anweisungsinformation ist hingegen eine unabdingbare Anforderung an den zu diesem Zweck auf der Struktur operierenden Algorithmus. Die Laufzeit eines Algorithmus hängt bei gegebener Performanz in der Regel von der Größe der Eingabe ab, hier also der Graphenstruktur. Die Laufzeit wird nach *best case*, *average case* und *worst case* unterschieden. Der *worst case* ist der Fall mit der längsten Rechenzeit des Algorithmus. Die Komplexität O eines Algorithmus für ein Problem der Größe N wird durch die Beziehung $O = f(N)$ definiert. Die Funktion $f(N)$ bestimmt die Komplexität als den Wachstumsgrad der Laufzeit bei Vergrößerung des Eingabeparameterbereichs (OTTMANN & WIDMAYER 2002). In der Praxis sind nur Algorithmen von Relevanz, deren Komplexität polynomial in Abhängigkeit der Eingabe beschränkt ist. Algorithmen mit einem exponentiellen Wachstum führen schon für kleine Problemstellungen zu nicht mehr akzeptablen Laufzeiten.

4.7 Benutzerorientierte Anforderungen

Nicht allein die Eigenschaften der technischen Systemkomponenten, sondern die Wahrnehmung und die Interaktionsmöglichkeiten des Werkers bestimmen die Leistungsmerkmale eines Gesamtsystems. Das Ziel der situationsorientierten Werkerführung und dem Produktzustand als führende Größe kommt diesem Zusammenhang entgegen. Eine wesentliche Frage bei der Entwicklung und Gestaltung der Mensch-System-Interaktion ist die nach der Zusammensetzung der Gesamtheit der Benutzer (in diesem Falle der Werker). Die Beantwortung dieser Frage trägt zu der Entscheidung bei, wie vollständig das System auf eine spezifische Benutzergruppe ausgerichtet sein kann. In Anlehnung an MOHS (2007) können hierzu vier Entscheidungsparameter eingeführt werden:

- *Flexibilität* eines Systems
- *Effizienz* eines Systems
- *Robustheit* eines Systems
- *Gewissheit* eines Systems

Die Wahl des Parameters *Flexibilität* bestimmt, ob die Varianz der anwendungsrelevanten Merkmale der Werker durch eine hohe Generalität des Interaktions- und Führungsprinzips berücksichtigt werden muss. Das Ziel ist eine optimale Benutzbarkeit für die Gesamtheit der Werker. Eine hohe Flexibilität ist ebenso sinnvoll und erforderlich, falls die Zusammensetzung der Gesamtheit der Werker nicht hinreichend abschätzbar ist oder sich das zum System hin gerichtete Verhalten im Verlauf der Anwendung, z. B. durch Lerneffekte, ändern kann. In Anlehnung an die Norm DIN EN 9241-110 (2008) ist der Grad der Genauigkeit und Vollständigkeit, mit welcher ein Werker die Montageaufgabe bewältigt, proportional zum Aufwand bezüglich der kognitiven Beanspruchung. Die *Effizienz* und die *Flexibilität* haben hinsichtlich der resultierenden Systemausprägung eine umgekehrte Auswirkung, da eine hohe Effizienz u. a. durch die möglichst vollständige Ausrichtung des Systems auf spezifische Merkmale der Werker erreicht wird. Die Flexibilität hingegen resultiert aus der Generalisierung in Bezug auf unterschiedliche Benutzermerkmale. Der Begriff der *Robustheit* stellt den Zusammenhang zwischen einer erfolgreichen Systembenutzung und der Beeinflussung durch Einflussgrößen, wie z. B. den Aufgabenkontext oder die Nutzungshäufigkeit, her. Über den Parameter *Gewissheit* erfolgt die Beschrei-

bung der subjektiven Bewertung der Sicherheit (Wahrscheinlichkeit des Zutreffens) einer Annahme durch den Benutzer.

Die aus den Entscheidungsparametern zu den benutzerorientierten Anforderungen abzuleitende Systemausprägung ist in Abbildung 31 dargestellt. Der Begriff der *Vertrautheit* gründet sich nach LUHMANN (2000) auf die Erfahrungen des Werkers mit dem Kontext. Der individuelle Werker geht davon aus, dass sich dieser Kontext in die Zukunft hinein fortsetzen wird und basiert diese Erwartung auf die eigene Erfahrung in der Vergangenheit. Die Vertrautheit als Konstrukt ist demnach primär an der Vergangenheit orientiert, während das daraus potenziell resultierende Vertrauen in die Zukunft gerichtet ist.

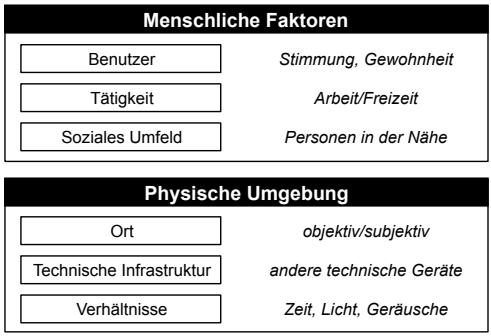


Abbildung 31: Entscheidungsparameter für die Ausrichtung der Systemgestaltung in Anlehnung an MOHS ET AL. (2007)

Der Begriff *erwartungskonform* bezieht sich auf Sachverhalte, die der Erwartung eines Menschen entsprechen. Dabei wird Erwartung von PUCA & LANGENS (2007) als „nicht notwendig bewusste, subjektive Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis eintreten wird“ beschrieben. Dies bedeutet, dass eine Erwartung mit einer relativ hohen Sicherheit bezüglich der getroffenen Annahme verbunden ist.

MOHS et al. (2006) beschreiben, dass ein technisches System im Rahmen einer Aufgabenstellung in dem Maße intuitiv benutzbar ist, in welchem der jeweilige Benutzer durch unbewusste Anwendung von Vorwissen effektiv mit dem System interagieren kann. Innerhalb dieser Begriffsbestimmung ist formuliert, dass ausschließlich Informationsverarbeitungsvorgänge des Menschen als intuitiv bezeichnet werden können. Von intuitiver Benutzbarkeit kann entsprechend nur im Gesamtkontext von Umgebung, Werker, Arbeitsaufgabe und Produkt gesprochen

werden, d. h. nur der Mensch-System-Interaktion in einem bestimmten Kontext kann Intuitivität zugesprochen werden, nicht jedoch einem technischen System per se. Es gilt, dass mit einer zunehmenden Vertrautheit eine höhere Effizienz für eine bestimmte Gruppe von Werkern erreicht werden kann. Jedoch wird mit einer zunehmenden Ausrichtung auf eine intuitive Benutzung eine höhere Stabilität der Benutzbarkeit in Bezug auf heterogene Werkergruppen erreicht, welche in ihren Eigenschaften nur in geringem Umfang bekannt sind.

Die Eigenschaften einer Zielgruppe sind in der Regel während der Entwicklung eines Systems noch nicht vollständig erfassbar oder bestimmt. Dahingehend ist anzustreben, dass die Systemausprägung (vertraut, erwartungskonform, intuitiv) auf die Ableitung der situationsorientierten Montagesequenz wirkt. Die aus der produktionstechnischen Zielsetzung stammende Forderung nach wirtschaftlicher Effizienz erfordert jedoch ein hinreichend vertrautes System bezüglich der prozessunabhängigen Auslegung. Der Werker soll zum einen die Kontrolle über die Gestaltung der Montagesequenz erhalten, zum anderen ist die Systemkomplexität gering zu halten, um einer Überforderung vorzubeugen. Dazu muss eine Abstimmung der Ausgabeinformation des Systems auf die Erfahrung und das Wissen des Werkers angestrebt werden. Dieser Aspekt ist von besonderer Bedeutung, da mit einem auf der Montagesequenz-Generierung aufgesetzten Assistenzsystem einerseits erfahrene Werker bei der Montage komplexer Produkte unterstützt, andererseits aber auch Werker ohne weitreichende Kenntnisse des Produkts zur Durchführung der Aufgabe befähigt werden sollen.

4.8 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurden die Aspekte der informationstechnischen Assistenz in der manuellen Montage betrachtet. Das Vorgehen unterteilte sich in eine empirische Untersuchung im Rahmen einer Studie und eine theorieorientierte Betrachtung der arbeitswissenschaftlichen Aspekte der Werkerunterstützung. Darauf aufbauend wurden die Anforderungen bezüglich Konzept, Technik und Benutzerorientierung erörtert. Daraus resultieren die Leitgedanken zur Entwicklung der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung im folgenden Kapitel.

5 Konzeption und Systementwurf

5.1 Allgemeines

In Kapitel 3 wurde hergeleitet, dass darstellende digitale Assistenzsysteme in der manuellen Montage in ihren bisherigen informationstechnischen Konzepten nicht optimal gestaltet sind, um eine effiziente Werkerführung zu gewährleisten. Zwar konnte sowohl eine Reduzierung der mentalen Belastung als auch eine Steigerung der Leistung für einzelne Aufgaben nachgewiesen werden (TANG et al. 2003), jedoch führt der Einsatz von Assistenzsystemen im Zusammenhang mit ablaufbedingten Folgen von Anweisungen nicht zu der erwarteten Produktivitätssteigerung (DOPPING-HEPENSTAL 1981, YEH & WICKENS 2000). Neben den in Abschnitt 1.1 (S. 1 ff.) erläuterten Faktoren führt das auftretende Phänomen des *attention tunneling* zu einer Überreizung der Aufnahmefähigkeit des Werkers. In Folge dessen tritt eine Ablenkung von wichtigen Einflussgrößen der physischen (Produktions-)Umgebung auf. Ein Grund hierfür liegt in der deterministischen Montageplanung und Generierung der Arbeitsanweisungen ohne Bezug zu dem tatsächlichen Kontext des Werkers oder zum Werker selbst. Die geringe situationsorientierte Unterstützung und die daraus resultierende starre Führung ohne Einbindung der Umgebung führen zu dem oben genannten Phänomen und zu einer geringen Akzeptanz seitens der Werker (SPATH & WEULE 1993, LIVINGSTON 2005). Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Studie „Adaptive und situationsorientierte Führung in der manuellen Montage“ hat gezeigt, dass an gewerblichen Arbeitsplätzen vielerorts die verbale und die papiergebundene Informationsübermittlung verbreitet sind. Eine schnelle und an den Montageprozess gebundene Informationsbereitstellung schafft die Voraussetzung dafür, dem Werker als Wissensträger weitere Produktivitätssteigerungen und Reaktionsfähigkeit auf ungeplante Ereignisse zu ermöglichen. Die Anforderungen hierfür können hinsichtlich konzeptioneller, technischer und benutzerorientierter Aspekte differenziert werden.

Eine Beseitigung der identifizierten Diskrepanzen wird vom Verfasser in einer Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung gesehen. Diese fußt auf der algorithmischen Bestimmung situationsgetriebener Pfade auf Montagegraphen in Abhängigkeit von Produkt, Kontext und Werker. Der Werker selbst wird informationsflusstechnisch in den Verbund von Produktionsmitteln und Montageplanung einbezogen.

5.2 Abbildung des Montageprozesses

5.2.1 Automobile Navigation als Analogie zur Werkerunterstützung in der manuellen Montage

Die Integration des Werkers in die informationsflusstechnische Kommunikation erfordert ein zusammenhängendes Verständnis der Elemente des Montageprozesses. Die Übermittlung des im Prozess hinterlegten Wissens ist unter Beachtung von kosten- und effizienzbezogenen Randbedingungen intuitiv zu gestalten. Eine Lösung hierfür stellt die Ableitung einer Analogie dar, welche die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung in den Kontext des Werkers überführt (vgl. Abschnitt 4.4, S 70).

Lernen und Verstehen unzureichend bekannter Zusammenhänge und Strukturen finden häufig über Analogien statt. Diese zeigen die Gemeinsamkeiten von im ersten Moment offensichtlich unterschiedlichen Ideen oder Gegenständen auf. Sie repräsentieren somit die Übereinstimmung von zwei Kontexten und tragen dazu bei, Unbekanntes zu reduzieren. NONAKA & TAKEUCHI (1997) formulieren hierzu: „Eine Analogie ermöglicht das Verständnis des Unbekannten durch das Bekannte (…).". Der Mensch denkt permanent in Metaphern (LAKOFF & JOHNSON 2004). Ebenso sieht HÜLZER-VOGT (1995) die Metaphern- oder Analogieerkennung als angeborene, kognitive Grundstrategie des Menschen. Dem Gebrauch von Analogien sind dabei Grenzen gesetzt. Die Anwendung ist als Ausgleich dualistischer Be- und Entlastungskomponenten zu sehen. Überschreitet der kognitive Anspruch eine gewisse Schwelle, so wird die Gebrauchstauglichkeit des unbekannten Kontextes nicht erhöht. Eine weitere Steigerung des kognitiven Anspruchs lässt die Analogie kollabieren: Der Anwender kann sie nicht mehr nachvollziehen.

Die in Abbildung 4 (S. 13) aufgezeigte Diskrepanz zwischen dem Anspruch des Werkers einerseits und den bestehenden Eigenschaften von Assistenzsystemen in der manuellen Montage andererseits begründet die Notwendigkeit der Herleitung einer Analogie für den Montagekontext. Darin finden die Werkerführung und die Assistenz ihren metaphorisch entsprechenden Kontext in der automobilen Navigation. Die Entwicklung der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung ist auf die Anwendung der in Abbildung 32 aufgezeigten metaphorischen Entsprechungen ausgerichtet.

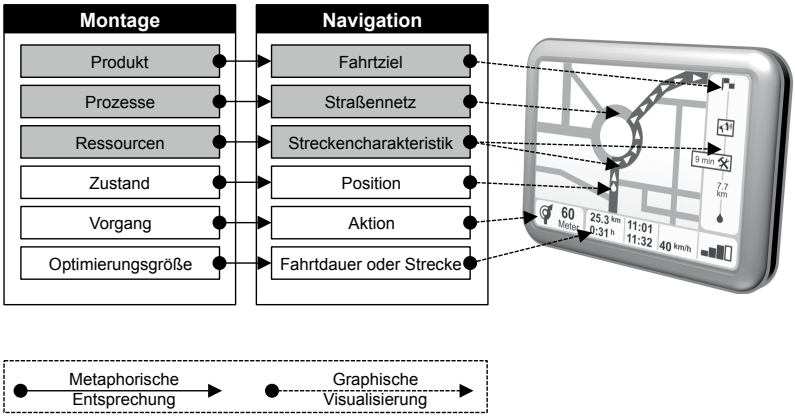


Abbildung 32: Entsprechung der Begriffe der automobilen Navigation aus der Sicht der Montageplanung

Laut einer Umfrage nutzt mittlerweile eine Mehrheit von ca. 60 % der Autofahrer in Deutschland ein Navigationssystem (TEMA-Q 2011). Es ist ohne weitere Ausführungen evident, dass somit die automobile Navigation als Interaktionskonzept den Anwendern (Werkern) in der industriellen Gesellschaft hinreichend vertraut ist. Das Anwendungskonzept der Navigation steht sowohl als gedankliche Grundlage als auch als zu visualisierendes Ziel für das im Rahmen dieser Arbeit ausgearbeitete Konzept der Montageführung.

5.2.2 Struktur und Elemente des Montageprozesses

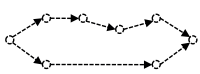
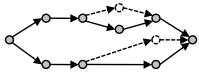
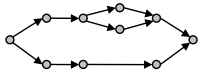
5.2.2.1 Typologisierung des Montageablaufes und Vorgehen

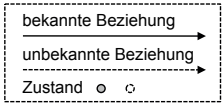
Grundsätzlich können bei der Betrachtung von Arbeits- bzw. Montageabläufen in Anlehnung an NASTANSKY & HILPERT (1994) drei Kategorien unterschieden werden:

- Unstrukturierte Abläufe (Ad-hoc-Abläufe)
- Semistrukturierte Abläufe
- Strukturierte Abläufe

Die Kategorien sind in Tabelle 6 einander gegenübergestellt. Dabei werden die grundlegenden Charakteristika jeder Kategorie angeführt. Es ist zu erkennen, dass sich aus der Differenzierung der Abläufe eine Unterscheidung zwischen einem einerseits flexiblen und dynamischen Vorgehen und andererseits einem strukturierten, planbaren Vorgehen ableiten lässt.

Tabelle 6: Typologien von Abläufen nach HUTH (2004)

	Ad-hoc-Ablauf	Semistrukturierter Ablauf	Strukturierter Ablauf
Beschreibung	▪ nicht vorbestimmter Montageablauf ▪ dynamische Ableitung der Montageoperationen zur Laufzeit	▪ vorgegebener Vorgang mit möglichen Ausnahmen ▪ Adaption des tatsächlichen Ablaufs	▪ vorbestimmter und strukturierter Ablauf ▪ wiederhol- und reproduzierbare Montagefolgen
Prozess	▪ sporadisch vorstrukturiert 	▪ teilweise vorstrukturiert 	▪ stark strukturiert 
Planbarkeit	▪ unvollständig	▪ partiell im voraus planbar	▪ im Voraus planbar
Beziehungen	▪ unbekannt	▪ partiell a priori bekannt	▪ a priori bekannt



Bezogen auf den Kontext stellt ein Ad-hoc-Ablauf einen Sonderfall dar, der sich im weitesten Sinne mehr mit einer künstlerischen Schaffenstätigkeit als mit einer produktionstechnischen Anwendung vergleichen lässt. Semistrukturierte Abläufe offerieren schrittweise Anleitungen, welche an einzelnen Stellen durch ungeplante Handlungen des Akteurs zu nicht a priori bekannten (Produkt-)Zuständen führen können.

Im Gegensatz dazu operiert die Montageplanung unter der Prämisse, dass alle geometrisch und mechanisch sinnfälligen Montagesequenzen durch entsprechende Verfahren ermittelt wurden. Alle für die Montage eines Produkts notwendigen und möglichen Tätigkeiten sind bekannt. Insofern stellt das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept eine Flexibilisierung des Montageablaufs auf Basis von strukturierten und vollständigen Abläufen dar.

Ausgehend von den Grundlagen und den Anforderungen wird die in dieser Arbeit vorgestellte Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen entlang der folgenden Handlungsfelder entwickelt:

- Interpretation der produktionstechnischen Elemente und Abbildung auf eine grundlegende Graphenstruktur;
- Erweiterung der grundlegenden Graphenstruktur durch Ausführungs- und Zustandsinformationen;
- Bestimmung der kombinatorischen Charakteristika des Montageablaufs;
- Identifikation der Komplexitätstreiber für die Ausführung und Entwicklung eines Maßes für den zeitlichen Aufwand;
- Reduktion des operativen Montagegraphen durch Referenzierung und hierarchische Strukturen;

Im Anschluss an die Ausarbeitung der Handlungsfelder werden die Ergebnisse in ein Datenmodell überführt.

5.2.2.2 Interpretation der produktionstechnischen Elemente und Abbildung auf eine grundlegende Graphenstruktur

Im Rahmen der Ausführungen zu den Begriffen und Grundlagen dieser Arbeit wurde die zum Verständnis notwendige Graphentheorie erläutert. Aufbauend auf den in Abschnitt 2.4 (S. 15 ff.) dargestellten Zusammenhängen werden im Folgenden die Elemente des Montageprozesses *Produktzustand* und *Fügevorgang* dahingehend interpretiert.

Durch die manuelle oder maschinelle Ausführung eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ geht der Produktzustand p_i eines zu montierenden Produkts P in den Produktzustand p_{i+1} desselben Produkts P über. Der Übergang zwischen Produktzustand p_i und Produktzustand p_{i+1} ist gerichtet. Letzteres bedeutet, dass der Übergang von Produktzustand p_i nach Produktzustand p_{i+1} nur durch die Ausführung der Umkehrung des Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$, also die äquivalente Demontage $\bar{o}_{(i,i+1)} = o_{(i+1,i)}$, erfolgen kann. Ebenso hat dies zur Folge, dass es keinen durch eine Montageoperation bestimmten Fügevorgang geben kann, durch dessen Ausführung der Produktzustand p_i eines zu montierenden Produkts P in sich selbst übergeht.

Somit gilt, dass im Rahmen der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung ein gerichteter Graph $G = (V, E)$ mit der Knotenmenge $V = \{v, w\}$ und der Kantenmenge $E = \{(v, w)\}$ mit $E \subseteq V \times V$ produktionstechnisch interpretiert werden kann (vgl. Abbildung 33).

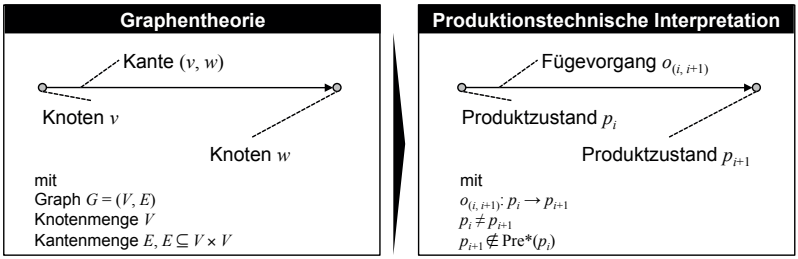


Abbildung 33: Graphentheoretische Abbildung und produktionstechnische Interpretation des Montageablaufs

Die Produktzustände werden als Objekte (Knoten des Graphen) visualisiert. Die Fügevorgänge werden als Beziehungen zwischen den Objekten (Kanten des Graphen) interpretiert. Ein Fügevorgang $o_{(i,i+1)}$ stellt in der graphentheoretischen Abbildung den gerichteten Übergang von Produktzustand p_i in den Produktzustand p_{i+1} dar. Der Ausschluss der Identität von zwei durch einen Fügevorgang verbundenen Produktzuständen ($p_i \neq p_{i+1}$) und die Annahme, dass keine Demontage im Rahmen eines Fügevorgangs ausgeführt wird ($p_{i+1} \notin \mathrm{Pre}^*(p_i)$), bedingen, dass der resultierende Graph azyklisch ist.

5.2.2.3 Erweiterung der grundlegenden Graphenstruktur durch Ausführungs- und Zustandsinformationen

Entsprechend der Analogie der automobilen Navigation stellt in der situationsorientierten Werkerführung die Bestimmung des Zustandes des Werkstückes das führende Steuerungskriterium des Montageprozesses dar. Die Information, welche den Zustand des Werkstücks spezifiziert, ist hinsichtlich ausführungsrelevanter und auftragsrelevanter Bestandteile zu unterscheiden. Letztere sind in den übergeordneten Planungssystemen von Bedeutung und werden in dieser Arbeit nicht im Detail betrachtet. Ausführungsrelevante Bestandteile der Informationen sind jene, welche in die den Montageablauf beeinflussenden Angaben einfließen.

Die Hinterlegung des geometrischen Zustandes des Werkstückes, wie er für den Montageprozess von Relevanz ist, kann in der formalen Repräsentation auf unterschiedlichen Detailebenen und je nach Anforderung des Anwenders erfolgen. Einerseits resultieren diese Anforderungen aus dem Bedarf hinsichtlich der Detaillierung der zu erzeugenden Montageanweisungen. Andererseits werden die Möglichkeiten durch die Verfügbarkeit von Informationen über den bestehenden Montageprozesses beschränkt. Die Definition der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung ist dahingehend adaptierbar und bietet dem Anwender die Wahlfreiheit bezüglich der Detaillierung der Produktzustände. Die Möglichkeit der tatsächlichen Bestimmung des aktuellen Produktzustands ist abhängig von der technischen Qualität und Robustheit der Sensorik und der Vollständigkeit der den Produktzustand beschreibenden Daten. Dies bedingt im operativen Betrieb eines darauf aufbauenden Montageassistenzsystems dessen Effektivität.

Die Abbildung durch ein (3D-)CAD-Modell erlaubt die Darstellung der Geometrie und der Zusammensetzung eines Werkstücks in dreidimensionaler Ansicht. Aufbauend auf anerkannten Modellierungsschemata (z. B. STEP, Jupiter Tesselation JT, VRML, Universal 3D) können diese Werkstückinformationen für die Montageplanung in Verbindung mit darstellenden Assistenzsystemen genutzt werden. Ausgehend von der algorithmischen Generierung von Ablaufplänen kann die Abbildung von Produktzuständen im relationalen Modell integriert werden. In der Modellierung werden die Relationen von Teilen abgebildet. Zudem werden den Teilen und den Relationen beschreibende Attribute zugewiesen. Mögliche aus der Produktentwicklung ableitbare Attribute sind Geometrieinformationen, Informationen zur Technologie oder Detaillierungen von Prozessinformationen der bestehenden Kontakte. Die Binärvektordarstellung stellt die Informationen zu hergestellten Verbindungen zwischen Bauteilen eines bestimmten Produktzustands zur Verfügung. Dabei beschränkt sich die Abbildung auf die Zustände der Oberflächenkontakte. Es ist möglich, Informationen über die Verteilung von Komponenten abzuleiten, jedoch ist keine Aussage über deren genaue Ausrichtung und Orientierung möglich. Ähnlich der Binärvektordarstellung kann mit Hilfe der Teilemengendarstellung eine Aussage über den Kontakt von zwei oder mehr Komponenten getroffen werden. Daten bezüglich der tatsächlichen Kontaktflächen oder Koordinaten von Kontaktpunkten werden nicht berücksichtigt. Diese Darstellung bietet sich somit für die Abbildung von Montagefolgen an, bei welchen keine detaillierten Anweisungsinformationen notwendig sind.

Diese Wahlfreiheit zwischen den in Abschnitt 3.2.3 (S. 34 ff.) aufgezeigten Verfahren zur Abbildung von Produktzuständen wird durch die in Abschnitt 5.2.3 (S. 99 ff.) vorgestellte Datenstruktur und die in Abschnitt 5.3 (S. 105 ff.) entwickelte algorithmische Verarbeitung unterstützt. Mit den angebotenen Detailebenen geht ein entsprechender Informationsgehalt (und -bedarf) einher, welcher in Abbildung 18 (S. 39 ff.) qualitativ dargestellt ist. Im Rahmen der Umsetzung der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung erfüllt die Abbildung des Produktzustands p_i in Anlehnung an das relationale Modell die technischen und die benutzerorientierten Anforderungen. Die Bestandteile der Zustandsinformation sind in Abbildung 34 aufgezeigt.

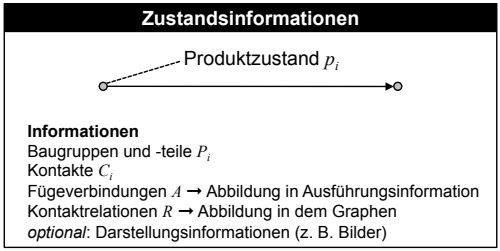


Abbildung 34: Zustandsinformationen in Anlehnung an das relationale Modell (engl. relational model representation)

Die Information bezüglich der für die Montage des Produkts notwendigen Baugruppen und -teile P_i referenziert auf die Elemente der Menge an individuellen Baugruppen und -teilen P, welche in der Montageumgebung verfügbar und zur Erreichung des finalen Produktzustands notwendig sind. Es gilt $P_i \subseteq P$.

Die Information zu den Kontakten C_i bezeichnet die zwischen den verbauten Baugruppen und -teilen im vorangegangenen Fügevorgang hergestellten Kontaktpunkte und -flächen. Hierbei symbolisiert ein Element der Menge $C_i \subseteq P_i \times P_i$ das Bestehen eines Kontakts.

Die Menge der Fügeverbindungen A stellt in Anlehnung an die Notation der Norm DIN 8593-1 (2003) eine erweiterte, aus der Produktentwicklung abgeleitete Verbindungsinformation dar. Die Elemente der Menge der Fügeverbindungen A entsprechen in ihrer Reihenfolge den Elementen der Menge der Kontakte C_i. Bei einem leeren Element ist der entsprechende Kontakt der beiden Baugruppen bzw. -teile nicht durch einen expliziten Fügevorgang erzeugt worden. Die Fügeverbindungen sind im Rahmen der Zustandsinformationen statisch und charakte-

risieren die Zusammensetzung der Baugruppen und -teile. Die Abbildung der entsprechend auszuführenden Fügeverbindung zur Überführung eines Produktzustands durch eine Montagefunktion in den folgenden Produktzustand ist im Rahmen der Bestimmung der Ausführungsinformation umgesetzt.

Die Kontaktrelationen R als Schnittmenge von Paaren aus P, C und A sind über die Konfiguration der Graphenstruktur gegeben. Die im relationalen Modell in den Angaben der a-Funktionen hinterlegten Informationen spiegeln sich implizit in der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung sowohl in der Graphenstruktur als auch in den Ausführungsinformationen wider.

Die Ausführungsinformation ist durch die Anwendung des Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ auf den Produktzustand p_i zur Transformation in den Produktzustand p_{i+1} definiert. Der Fügevorgang $o_{(i,i+1)}$ wird, wie in Abbildung 35 dargestellt, durch das folgende Tripel notwendiger Informationen bestimmt:

- Verweis auf die/das Basis-Baugruppe/-teil des Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ in P;
- Verweis auf die/das Aktions-Baugruppe/-teil des Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ in P;
- Bestimmung der Fügeverbindung A;

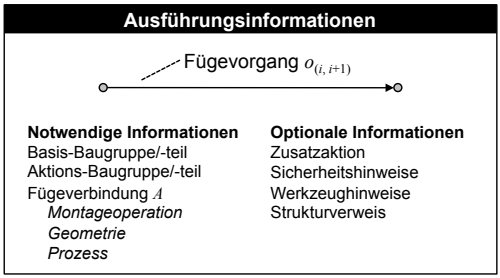


Abbildung 35: Notwendige und optionale Ausführungsinformationen eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$

Die Verweise auf die Basis- und die Aktions-Baugruppen/-teile ermöglichen die Ableitung einer syntaktisch korrekten Anweisungsinformation. Diese Informationselemente gewährleisten eine Fehlervermeidung und zugleich eine ergonomische Kommunikation mit dem Werker. Die Fügeverbindung A ist durch die folgenden Angaben charakterisiert:

- Montageoperation: Informationen zu der durchzuführenden Montageoperation und zu der dabei angewandten Verbindungstechnologie (z. B. Schraubverbindung) in Anlehnung an die Norm DIN 8593-1 (2003);
- Geometrie: Geometrieinformationen der Verbindung im Sinne von Positionierung und Orientierung der zu fügenden Baugruppen/-teile zueinander nach der Richtlinie VDI 2860 (1990) und bedarfsorientierte Angaben zu den Hilfsmitteln (z. B. Lage einer Kleberaupe);
- Prozess: Erweiterte Prozessinformationen der herzustellenden Verbindung (z. B. Drehmoment einer Schraubverbindung);

Die optionalen Ausführungsinformationen haben keinen Einfluss auf die grundlegende Struktur des Graphen oder die Betriebsfähigkeit eines auf der Struktur aufbauenden Systems zur Montageassistenz. Ähnlich der optionalen bildhaften Darstellung des Produktzustands (vgl. Abbildung 34, S. 84) erweitern die dem Fügevorgang $o_{(i,i+1)}$ zugeschriebenen Informationen den Detailierungsgrad und das Maß der Verständlichkeit der darauf erzeugten Anweisungen für den Werker. Eine besondere Rolle kommt dem Strukturverweis als optionale Information zu. Dieser Verweis wird im Rahmen der Reduzierung der Struktur des Montagegraphen durch die Referenzierung von Fügevorgängen und die Einbindung hierarchischer Ablaufstrukturen angelegt (siehe Abschnitt 5.2.2.6, S. 96 ff.).

5.2.2.4 Bestimmung der kombinatorischen Charakteristika des Montageablaufs

In den vorangegangenen Abschnitten 5.2.2.2 (S. 81 ff.) und 5.2.2.3 (S. 82 ff.) wurden die produktionstechnischen Elemente der Montage graphentheoretisch interpretiert und hinsichtlich der Eigenschaften des Produktzustands und des Fügevorgangs erweitert. Im Rahmen der Montage eines Produkts wird eine Zustandsfolge von dem vollkommen zerlegten Produkt hin zu dem vollständig montierten Produkt durchlaufen. In der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung entspricht dies einem Pfad von der Quelle zur Senke des Graphen. Gleichermaßen ist dies eine durchführbare und zulässige Montagesequenz.

Ausgehend von einem Produktzustand hat der Werker die Wahlfreiheit bezüglich des folgenden Fügevorgangs. Die in der Montageplanung ermittelten mechanischen und geometrischen Restriktionen der Montagereihenfolge werden in der

Graphenstruktur anhand von zwei elementaren Zustandsfolgen abgebildet. Ohne Restriktion der Reihenfolge zweier ausgewählter Fügevorgänge besteht ausgehend von dem Produktzustand p_i die Wahlfreiheit, das Werkstück durch die Ausführung eines Fügevorgangs in den Produktzustand p_j oder p_k zu überführen (siehe Abbildung 36 *links*). Entsprechend des darauffolgenden Fügevorgangs wird das Werkstück in den Produktzustand p_m überführt. Ist eine Restriktion der Reihenfolge der Fügevorgänge, welche den Produktzustand p_i in den Produktzustand p_m überführen, gegeben, so besteht, ausgehend von dem Produktzustand p_i, keine Wahlfreiheit. Die Folge der Fügevorgänge (und Produktzustände) ist vorgegeben (siehe Abbildung 36 *rechts*).

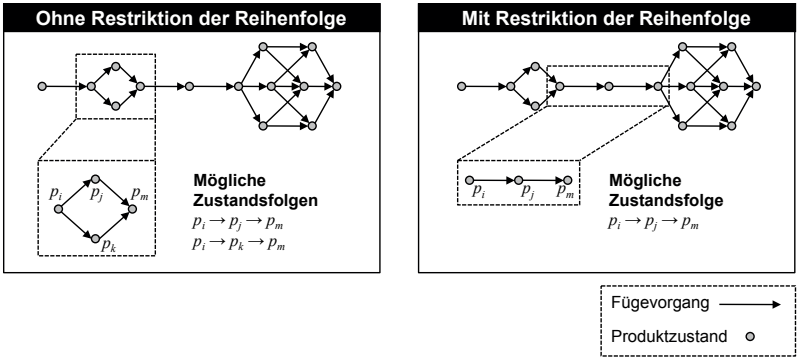


Abbildung 36: Graphenstrukturen und mögliche Zustandsfolgen ohne Restriktion der Reihenfolge der Fügevorgänge (links) und mit Restriktion der Reihenfolge der Fügevorgänge (rechts)

Die gesamthafte Abbildung aller Reihenfolgerestriktionen der Fügevorgänge im Rahmen der Montageplanung bildet die Zusammenhänge der Produktzustände ab. Diese Zusammenhänge, als die den Montageprozess führenden Elemente, stellen das Grundgerüst für die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung dar. Die möglichen Zustandsfolgen sind hinsichtlich ihrer Optimalität unterschiedlich zu bewerten. Das die Optimalität bestimmende Kriterium bedarf eines Komplexitätsmaßes für den (zeitlichen) Aufwand von Montagefolgen. Dieses wird im folgenden Abschnitt hergeleitet.

5.2.2.5 Identifikation der Komplexitätstreiber für die Ausführung und Entwicklung eines Maßes für den zeitlichen Aufwand

Der zeitliche Aufwand eines Vorgangs wird anhand der Gesamtdauer der Operationen einer Sequenz bemessen. Dies stellt allgemein deren Komplexität dar und ist die im Rahmen der Werkerführung zu optimierende Systemgröße. Es wurde gezeigt, dass bestehende Ansätze und Lösungen zur Bemessung der Komplexität eines Montagevorgangs mehrheitlich die physischen Merkmale der Bauteile (z. B. geometrische Größe) und der Bewegungsabläufe (z. B. Weg, Genauigkeit) einbeziehen. Die Integration kognitiver und wissensbasierter Aspekte beschränkt sich auf ausgewählte Vorgänge (siehe Abschnitt 3.2.4, S. 39 ff.). In der Betrachtung manuell ausgeführter Fügevorgänge ist jedoch die Interdependenz von kognitiven Prozessen und Aufgabeneigenschaften zu beachten. Insbesondere in der Montage variantenreicher und komplexer Produkte besteht hierbei eine Komplexität hinsichtlich der Entscheidungen im Verlauf des Montageprozesses, welche eine Analyse der relevanten menschlichen Kognitionsprozesse und der entsprechenden Engpässen bezüglich der Informationsverarbeitung notwendig macht.

Das dieser Arbeit zugrundliegende Forschungsprojekt *ACIPE - Adaptive Cognitive Interaction in Production Environments* war Teil des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Exzellenzclusters 142 *Cognition for Technical Systems - CoTeSys*. Der grundlegende Einfluss der Kognition in der manuellen Montage wurde gemeinsam mit den involvierten Mitarbeitern des Lehrstuhls für Allgemeine und Experimentelle Psychologie an der Ludwig-Maximilians-Universität München entwickelt. Das Komplexitätsmaß $d(o_{(i,i+1)})$ der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung begründet sich auf den folgenden Erkenntnissen:

- Der zeitliche Aufwand von Montageprimitiven wird neben dem Komplexitätselement nach SvZ durch die Positionierung und die Orientierung des vom Werker geführten Montageobjektes im Zielzustand beeinflusst. Dies wird als kognitives Komplexitätselement bzw. als *kognitiver Beanspruchungsfaktor* bezeichnet.

- In einer Montagesequenz wird die Ausführung des finalen Montageprimitivs durch die kognitive Komplexität des vorangegangenen Montageprimitivs derart beeinflusst, dass zur optimalen Leistungserbringung einfache Montageprimitive den komplexeren voran gehen sollten.

Ausgehend von den Grundlagen bestehender Maße zur Bestimmung der Komplexität von Montagevorgängen, den Anforderungen hinsichtlich der situationsorientierten Werkerführung und obigen Erkenntnissen bestimmen die Einflüsse von Prozess, Produkt und Mensch das Maß der Komplexität eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$. Diese Einflüsse stellen die Grundlage für drei die Komplexität bestimmende Dimensionen der Belastung und Beanspruchung dar (siehe Abbildung 37). Diese Dimensionen sind

- das physische Belastungselement $t_{SvZ}(o_{(i,i+1)})$,
- das wissensbasierte Beanspruchungselement $t_w(o_{(i,i+1)})$ und
- der kognitive Beanspruchungsfaktor $f_k(o_{(i,i+1)})$.

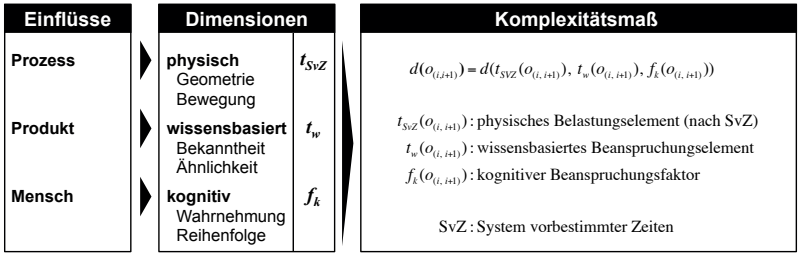


Abbildung 37: Belastungseinflüsse und daraus resultierende Belastungs- und Beanspruchungselemente des Komplexitätsmaßes für einen Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$

Im Folgenden werden die Eigenschaften der Dimensionen erläutert und im Anschluss deren funktionaler Zusammenhang beschrieben.

Das physische Belastungselement $t_{SvZ}(o_{(i,i+1)})$ eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ spiegelt die aus den geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Fügevorgangs resultierende zeitliche Dauer wider. Die Ermittlung dieser begründet sich auf dem Verfahren, welches durch das gewählte System vorbestimmter Zeiten gegeben ist. Unter der notwendigen Voraussetzung, dass das Resultat eine zeitliche Dauer darstellt, kann das dem Anwender naheliegende System vorbestimmter Zeiten eingesetzt werden. Eine zu beachtende Annahme ist der informationstechnische Inhalt der Ausführungsinformationen eines Fügevorgangs (siehe Abschnitt 5.2.2.3, S. 82 ff.). Dieser ist entsprechend den Eingangsparametern des Bestimmungsverfahrens auszulegen. Im Rahmen dieser Arbeit lehnt sich die Beschreibung der Ausführungsinformationen eines Fügevorgangs an die Norm

DIN 8593-1 (2003) und die Richtlinie VDI 2860 (1990) an. Ausgehend von der Verbreitung der Systeme vorbestimmter Zeiten begründet sich in dieser Arbeit die Anwendung des Verfahrens MTM (siehe Abschnitt 3.2.4.2, S. 39 ff.). Die Anpassung an geänderte Randbedingungen ist Teil der technischen Realisierung.

Die nach dem Verfahren MTM ermittelte Dauer der Fügevorgänge stellt das grundlegende Maß zur Bestimmung einer im Sinne dieser Arbeit optimalen Montagesequenz dar. Hiermit ist die von Werker und Kontext unabhängige Vorbelegung der Graphenstruktur eines zu fertigenden Produkts möglich. In Ergänzung zu Zustands- und Ausführungsinformationen kann damit die Vollständigkeit der Graphenstruktur im Sinne der Anwendung festgestellt werden. Die resultierenden Montagesequenzen entstammen im Sinne der Systeme vorbestimmter Zeiten dem in mehrfacher Hinsicht durchschnittlichen Werker.

Das wissensbasierte Beanspruchungselement $t_w(o_{(i,i+1)})$ eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ trägt der aus dem Informationsgehalt einer dem Fügevorgang zugehörigen Anweisung $a_{(i,i+1)} = a(o_{(i,i+1)})$ resultierenden Komplexität Rechnung. Im Sinne der Ausgangssituation wird dem Werker die Wahlfreiheit hinsichtlich der individuell effizientesten Montagesequenz offeriert. Diese Wahlfreiheit ist in der Graphenstruktur in Knoten (mit mehr als einer ausgehenden Kante) abgebildet. Dabei kann eine Anweisung, welche im folgenden Fügevorgang resultiert, aus Sicht des Werkers als ein zufälliges Ereignis im Verlauf der Montage interpretiert werden. Die Reaktion des Werkers auf die Zufälligkeit des Fügevorgangs (dessen Eintretenswahrscheinlichkeit) wird durch die Vertrautheit des Werker mit den Arbeitsabläufen auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen des Montagesystems beeinflusst. Die Einflussgröße *Eintretenswahrscheinlichkeit* wird im Rahmen eines informationstheoretischen Ansatzes in ein Beanspruchungselement $t_w(o_{(i,i+1)})$ überführt.

Der Informationsgehalt $I(a_{(i,i+1)})$ einer Anweisung $a_{(i,i+1)}$ als auslösendes Ereignis für einen Fügevorgang begründet sich auf den Ausführungen zu der Informationstheorie nach WIENER (1965) und SHANNON (1948). Demnach ist der Informationsgehalt einer zufälligen Anweisung als der in Gleichung 3 dargestellte duallogarithmische Kehrwert der Eintretenswahrscheinlichkeit $P(X = a_{(i,i+1)})$ der Anweisung definiert:

$$I(a_{(i,i+1)}) = log_2 \frac{1}{P(X = a_{(i,i+1)})} = -log_2 P(X = a_{(i,i+1)}) \tag{3}$$

Es ist ersichtlich, dass die inhaltliche Bedeutung einer Anweisung nicht in die Ermittlung des Informationsgehaltes eingeht, sondern dass lediglich deren statistischer Zusammenhang bewertet wird. Daher können bedeutende bzw. kritische Anweisungen nur einen geringen Informationsgehalt aufweisen, wenn sie erwartungsgemäß eintreffen. Gleichsam kann sich die informationstheoretische Bewertung der Komplexität der Anweisung auf die Betrachtung der Merkmale des Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ nach Abschnitt 5.2.2.3 (S. 82 ff.) beschränken (siehe Gleichung 4):

$$I(o_{(i,i+1)}) = I(a_{(i,i+1)}) = -log_2 P(X = o_{(i,i+1)}) \tag{4}$$

Das in das Komplexitätsmaß $d(o_{(i,i+1)})$ eingehende wissensbasierte Beanspruchungselement $t_w(o_{(i,i+1)})$ repräsentiert den Informationsgehalt der Montagesequenz. Ausgehend von dem aktuellen Produktzustand, d. h. den Knoten in der Graphenstruktur, sind die im Verlauf der weiteren Montage gegebenen Wahlmöglichkeiten der Sequenzanpassung zu berücksichtigen. Eine Sequenz mit einer geringen Anzahl an Wahlmöglichkeiten im Verlauf der Montage ist unter Berücksichtigung der Beanspruchung des Werkers zu bevorzugen. Die Auswahlreaktionszeit, welche in einem Zusammenhang mit dem Informationsgehalt einer Montagesequenz steht, fließt in Anlehnung an das Hick-Hyman'schen Gesetz in das Komplexitätsmaß ein (HICK 1952, HYMAN 1953).

Das Wahrscheinlichkeitsmaß $P(X = o_{(i,i+1)})$ eines Fügevorgangs resultiert aus der Gesamtheit der individuellen Fügevorgänge des zu fertigenden Produkts, welche nach der zuvor bestimmten Abbildung in der Graphenstruktur unterschieden werden können. Die Ermittlung erfolgt anhand des Montagegraphs.

Im Sinne der Informationstheorie misst die Entropie $H_{Vorgang}(o_{(i,i+1)})$ (der erwartete Informationsgehalt) eines Montagevorgangs den Grad der Unsicherheit vor dem Eintreten einer Entscheidung. Sie wird aufgrund der partiellen Informationsgehalte der betrachteten Auswahlentscheidung, ausgehend von einem Produktzustand p_i nach Gleichung 3, ermittelt und mit dem jeweiligen Erwartungswert gewichtet (siehe Gleichung 5):

$$H_{Vorgang}(o_{(i,i+1)}) = -P(X = o_{(i,i+1)}) \cdot log_2 P(X = o_{(i,i+1)}) \tag{5}$$

Hinsichtlich der Betrachtung des Hick-Hyman'schen Gesetzes ist die mittlere Auswahlreaktionszeit $T(o_{(i,i+1)}) = t_w(o_{(i,i+1)})$ (siehe Gleichung 6) nach einem Reiz (hier: Anweisung) proportional zu der differentiellen Entropie der Entscheidung (HICK 1952, HYMAN 1953). Unter der Annahme, dass ausgehend von einem

Produktzustand p_i die Wahrscheinlichkeiten der folgenden Produktzustände $p_{i+1} \in \text{Post}(p_i)$ identisch sind, resultiert daraus Gleichung 6:

$$t_w(o_{(i,i+1)}) = v_{Werker} \cdot \sum_{p_{i+1} \in \text{Post}(p_i)} log_2\left(\frac{1}{P(X = o_{(i,i+1)})} + 1\right) \tag{6}$$

Die Konstante v_{Werker} wird empirisch ermittelt und ist abhängig von dem individuellen Werker und seiner Vertrautheit mit dem System bzw. Produkt. Die Erweiterung des Bezuges des in Gleichung 6 ermittelten wissensbasierten Beanspruchungselements von einem einzelnen Montagevorgang auf eine Montagesequenz zu $t_{w,seq}$ kann anhand des logarithmischen Zusammenhangs der Auftretenswahrscheinlichkeit nach Gleichung 7 bestimmt werden. Die betrachtete Montagesequenz geht von einem Startknoten s bis zu einem Endknoten z:

$$t_{w,seq} = v_{Werker} \cdot \sum_{i=s}^{z-1} \sum_{p_{i+1} \in \text{Post}(p_i)} log_2\left(\frac{1}{P(X = o_{(i,i+1)})} + 1\right) \tag{7}$$

Der kognitive Beanspruchungsfaktor $f_k(o_{(i,i+1)})$ spiegelt den Einfluss des Aufwands der mentalen Verarbeitung des Werkers während eines Montagevorgangs wider. Der Aufwand manueller Montagevorgänge von variantenreichen Produkten wird nicht ausschließlich von der physischen Ausführungskomplexität, sondern auch von der mentalen Verarbeitung der Anweisungsinformation beeinflusst. Die Begründung liegt in den Elementen Wahrnehmung, Entscheidung und Ausführung (vgl. Abbildung 20, S. 44). Dementsprechend sind die Anforderungen an die mentalen Verarbeitungsebenen durch ein Montageprimitiv bzw. eine Montageanweisung und die daraus resultierende Ausführungsleistung (hier: Beeinflussung der Zeit nach SvZ) einander gegenüber zu stellen. Diese Beziehung bildet die analytische Grundlage des kognitiven Beanspruchungsfaktors $f_k(o_{(i,i+1)})$.

Der genannte Zusammenhang wurde im Rahmen einer experimentellen Studie unter Mitarbeit des Verfassers zum Einfluss der Sequenzstruktur und von Änderungen der Aufgabenkomplexität in Sequenzen von Montageprimitiven auf die Ausführungszeit untersucht. An der Studie des Forschungsprojekts *ACIPE - Adaptive Cognitive Interaction in Production Environments* nahmen 24 Probanden teil. Davon waren neun weiblich und 15 männlich. Das durchschnittliche Alter der Probanden betrug 23,5 Jahre. Alle Probanden waren Rechtshänder, hatten eine normale bzw. korrigierte Sehkraft und waren nicht farbenblind.

Die Montageprimitive wurden anhand des angestrebten Ordnungszustands des Werkstücks (Aktions-Baugruppe/-teil) als Maß für die Aufgabenkomplexität gegliedert. Der dem Montageprimitiv zuzuordnende Ordnungszustand ist anhand der Empfehlungen der Richtlinie VDI 2860 (1990) bestimmt und steht in Analogie zu den in Abschnitt 5.2.2.3 (S. 82 ff.) als notwendig deklarierten Angaben zur Fügeverbindung. Dabei können die zwei Freiheitsgrade *Ausführungsorientierung* (Orientierungsgrad *OD*) und *Ausführungspositionierung* (Positionierungsgrad *PD*) unterschieden werden (siehe Tabelle 7).

Tabelle 7: Beschreibung der Freiheitsgrade Ausführungsorientierung (Orientierungsgrad OD) und Ausführungspositionierung (Positionierungsgrad PD) als Bestandteile des angestrebten Ordnungszustands der/des Aktionsbaugruppe/-teils

Orientierungsgrad (OD)		Positionierungsgrad (PD)	
Die Orientierung des Werkstücks ist in allen drei Rotationsachsen bestimmt.	OD_3	Die Position des Werkstücks ist in allen translatorischen Freiheitsgraden bestimmt.	PD_3
Die Orientierung des Werkstücks ist in genau zwei Rotationsachsen bestimmt.	OD_2	Das Werkstück ist auf einer Kurve im Arbeitsraum positioniert.	PD_2
Die Orientierung des Werkstücks ist in genau einer Rotationsachse bestimmt.	OD_1	Das Werkstück ist in einer Ebene im Arbeitsraum positioniert (i.d.R. Arbeitsfläche)	PD_1
Die Orientierung des Werkstücks ist in keiner Rotationsachse bestimmt.	OD_0	Das Werkstück ist an beliebiger Position im Arbeitsraum positioniert.	PD_0

Die Zusammensetzung der beiden Freiheitgrade stellt den Ordnungszustand *OS* dar. Dabei gilt Gleichung 8. Im Sinne der Begriffsbestimmung nach der Richtlinie VDI 2860 (1990) ist $k \geq 1$ und $l \geq 1$. Es gilt:

$$OS = OS_{k,l} \text{ für } OD = OD_k \text{ und } PD = PD_k \tag{8}$$

Die Studienergebnisse belegen, dass die Sequenzstruktur keinen systematischen Einfluss auf die Bewegungsausführung in den einzelnen Montageprimitiven der Montagesequenz hat. Die Anwendung der Montageprimitive wird jedoch vom angestrebten Ordnungszustand des aktuellen und des vorhergehenden Montageprimitivs beeinflusst. Dabei resultieren Ordnungszustände mit einer geringeren Anzahl an Freiheitsgraden in längeren Zeiten als solche mit einer größeren Anzahl an Freiheitsgraden. Ordnungszustände, die eine Orientierungsbewegung erfordern, resultieren in längeren Ausführungszeiten als solche, die eine Positionierungsbewegung erfordern. Die abschließende Platzierungsphase eines Montageprimitivs nimmt mehr Zeit in Anspruch, falls der Ordnungszustand vom vorhergehenden zum aktuellen Montageprimitiv erhöht wurde. Eine Änderung

des Orientierungsgrades hat einen stärkeren Einfluss als eine Änderung des Positionierungsgrades. Zusammenfassend wurde festgestellt, dass die Ausführung eines Montageprimitivs nicht nur von den Merkmalen des selbigen, sondern auch von den Merkmalen des vorangehenden Montageprimitivs abhängig ist. Die Additivität der zeitlichen Aufwände von elementaren Montageoperationen und Montageprimitiven ist somit als nicht gegeben anzusehen.

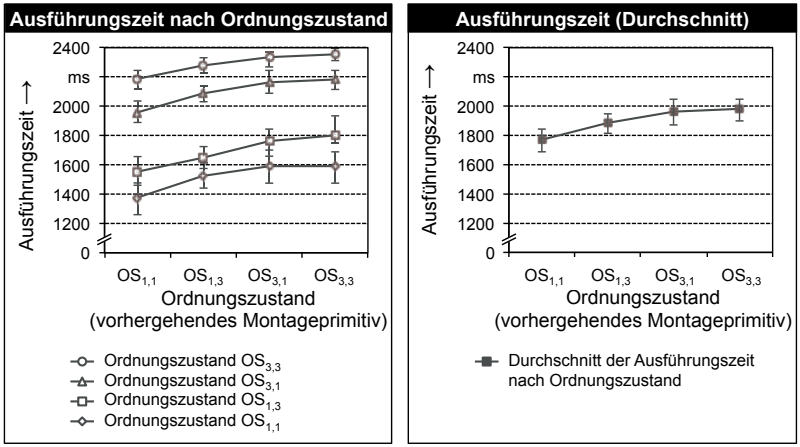
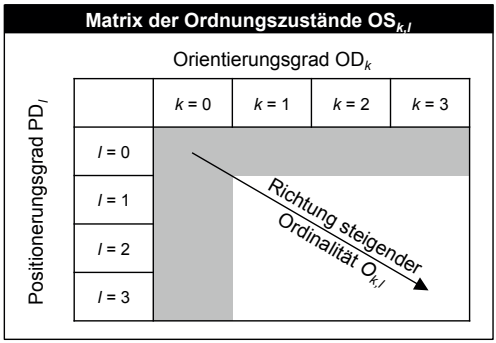


Abbildung 38: Kennlinien der Ausführungszeit von Montageprimitiven in Abhängigkeit des Ordnungszustands des vorhergehenden Montageprimitivs

Die Ordinalität $O_{k,l}$ als Kenngröße des Ordnungszustands stellt als Eingangsinformation den Ordnungszustand $OS_{k,l}$ des vorhergehenden Montageprimitivs dar. Die Zuordnung der Ordinalität ist in Abbildung 39 dargestellt.



Zuordnung der Ordinalität

$O_{k,l}$	Zustandsmenge $\{(k,l)\}$
0	$\{(k,l) \mid k = 0 \vee l = 0\}$
1	{(1,1)}
2	{(1,2)}
3	{(1,3)}
4	{(2,1), (2,2), (2,3)}
5	{(3,1)}
6	{(3,2)}
7	{(3,3)}

Abbildung 39: Ordinalität $O_{k,l}$ als Eingangsinformation zur Ermittlung des kognitiven Beanspruchungsfaktors $f_k(o_{(i,i+1)})$

Ausgehend von der identifizierten Abhängigkeit der Ausführungszeit vom Ordnungszustand des betrachteten Montageprimitivs $o_{(i,i+1)}$ und vom Ordnungszustand des vorhergehenden Montageprimitivs $o_{(i-1,i)}$ kann anhand einer linearen Interpolation die Gleichung 9 abgeleitet werden:

$$\text{Ausführungszeit} = O_{k,l}(OS_{k,l}(o_{(i-1,i)})) * 34{,}9\ \text{ms} + 1754\ \text{ms} \tag{9}$$

Das Bestimmtheitsmaß R^2 des linearen Zusammenhangs beträgt 0,90405. Der Zusammenhang kann somit als linear angenommen werden. Der Ordinatenabschnitt in Gleichung 9 stellt die Ausführungszeit des Montageprimitivs $o_{(i-1,i)}$ ohne vorhergehendes Montageprimitiv dar. Daraus abgeleitet kann der kognitive Beanspruchungsfaktor $f_k(o_{(i,i+1)})$ anwendungsorientiert als 2-prozentiges Vielfaches (berechneter Wert: 1,99 %) der Ordinalität $O_{k,l}$ abgeschätzt werden (siehe Gleichung 10):

$$f_k(o_{(i,i+1)}) = O_{k,l}(OS_{k,l}(o_{(i-1,i)})) \cdot 2 \cdot 10^{-2} \tag{10}$$

Die Zusammenführung der physischen, der wissensbasierten und der kognitiven Dimension resultiert in dem Komplexitätsmaß der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung. Dabei gilt Gleichung 11:

$$d(o_{(i,i+1)}) = d(t_{SvZ}(o_{(i,i+1)}), t_w(o_{(i,i+1)}), f_k(o_{(i,i+1)})) \tag{11}$$

Ergänzt durch den Zusammenhang der beschriebenen Dimensionen und im Anwendungsfall der komplexen und variantenreichen Montage gilt Gleichung 12:

$$d(o_{(i,i+1)}) = t_{SvZ}(o_{(i,i+1)}) + t_w(o_{(i,i+1)}) + t_{SvZ}(o_{(i,i+1)}) \cdot f_k(o_{(i,i+1)}) \qquad (12)$$

Für den Fall, dass aufgrund technischer oder organisatorischer Restriktionen eine Integration des kognitiven und des wissensbasierten Faktors nicht möglich ist, kann die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung ausschließlich auf Grundlage des physischen Belastungselements $t_{SvZ}(o_{(i,i+1)})$ zur Anwendung gebracht werden. Es gilt Gleichung 13:

$$d(o_{(i,i+1)}) = d(t_{SvZ}(o_{(i,i+1)}),0,1) = t_{SvZ}(o_{(i,i+1)}) \qquad (13)$$

5.2.2.6 Reduktion des operativen Montagegraphen durch Referenzierung und hierarchische Strukturierung

Die Abbildung der Kombinatorik und die Anwendung der Restriktionen in der Reihenfolge von Montageoperationen haben zur Folge, dass ein Montagegraph ohne weitere Strukturveränderung Montageoperationen und zusammenhängende Montagevorgänge mehrfach enthält. Die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung ist daher hinsichtlich einer effizienten Datenspeicherung und Anwendung des Algorithmus zur Bestimmung der aktuellen Montagesequenz zu adaptieren. Diese Anpassungen sind zum einen strukturell geprägt (siehe vorliegender Abschnitt) und werden zum anderen durch eine entsprechende algorithmische Einbeziehung der Strukturelemente erreicht. Die algorithmische Einbeziehung wird in Abschnitt 5.3.3 (S. 109 ff.) detailliert. Die strukturellen Erweiterungen des Montagegraphen können in drei Gruppen unterteilt werden:

- Referenzierung von äquivalenten Fügevorgängen;
- Hierarchisierung durch Subgraphen;
- Kombination der beiden obigen Strukturelemente;

Im Folgenden werden die Grundzüge und die Implikationen der oben genannten Strukturelemente erläutert.

Die *Referenzierung von äquivalenten bzw. ausführungsgleichen Fügevorgängen* fußt auf der Einbringung der Kombinatorik von Fügevorgängen in die Struktur des Montagegraphen. Im Rahmen der Erzeugung von möglichen Zustandsfolgen ohne und mit Reihenfolgerestriktion der Fügevorgänge kann somit auch deren Auswahl geschehen (siehe Abschnitt 5.2.2.4, S. 86 ff.). Ist ein dem betrachteten

Fügevorgang äquivalenter Fügevorgang identifiziert, so werden die diesen Vorgang abschließenden Produktzustände virtualisiert (vgl. Abbildung 40). Die Virtualisierung eines Produktzustands bedeutet die Abstraktion von dessen Informationselementen, unabhängig von der Stelle in der produktspezifischen Graphenstruktur. Die den Produktzustand in den Zusammenhang des Gesamtprodukts stellenden Eigenschaften werden entfernt und durch Platzhalter gefüllt. Anstelle einer vollständigen Beschreibung des Produktzustands tritt der virtuelle Produktzustand. Ebenso werden vollständige Beschreibungen von Fügevorgängen durch Referenzen (Verweise) auf ausführungsgleiche Fügevorgänge zwischen den virtuellen Produktzuständen ersetzt.

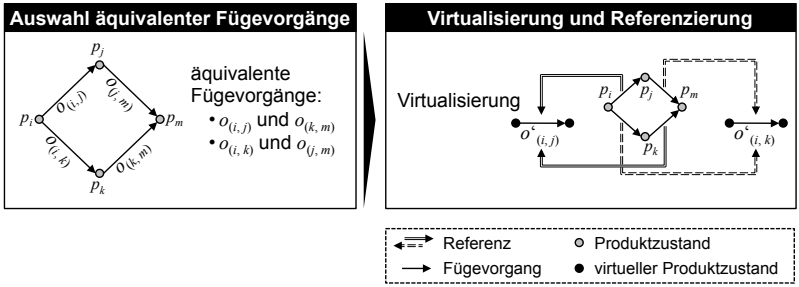


Abbildung 40: Reduzierung der Struktur des Montagegraphen durch Referenzierung von Fügevorgängen

Im Rahmen der Verarbeitung der Graphenstruktur und der Ausgabe einer Montagesequenz baut darauf die algorithmische Erzeugung einer produkt- und situationsorientierten Vorgangsfolge auf. Die aufeinanderfolgenden virtuellen Produktzustände werden in Produktzustände transformiert. Eine Transformation ist nur für die Produktzustände notwendig, welche in der ausgewählten Montagesequenz enthalten sind. Die zuvor zu Grunde gelegte Kombinatorik der Fügevorgänge und der daraus resultierende Zusammenhang zwischen den äquivalenten Fügevorgängen haben zur Folge, dass dies für jeden virtuellen Produktzustand nicht öfter ausgeführt wird, als dieser in der Montagesequenz bestimmt ist.

Die Kombinatorik der Reihenfolgerestriktion innerhalb der Montage eines Produkts ist nicht auf einzelne Fügevorgängen beschränkt. Ebenso ist dies zwischen Gruppen zusammengehöriger Fügevorgänge (z. B. Vorgänge zur Anbringung von Baugruppen) gegeben. In Abbildung 41 ist der Zusammenhang des Struktu-

relements *Subgraph* mit dem Montagegraphen als Ausgangsstruktur visualisiert. Anstelle des Subgraphen wird in die Struktur des Montagegraphen eine Referenz eingebracht. Ähnlich der elementaren Referenz im vorangegangenen Absatz dieses Abschnitts verweist diese auf eine durch virtuelle Produktzustände bestimmte Struktur (den Subgraph).

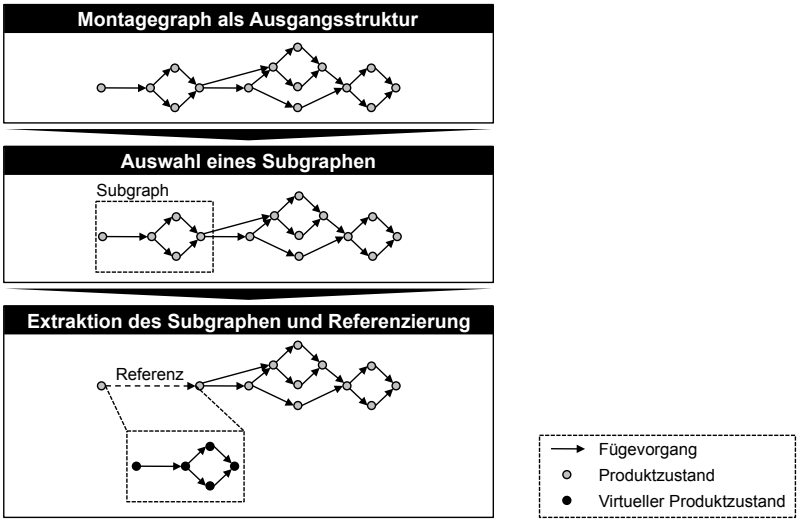


Abbildung 41: Hierarchische Ablaufstrukturen im Montagegraph durch Referenzierung von Subgraphen

Die *hierarchische Detaillierung* bzw. das Strukturelement Subgraph gewährleistet die Optimierung der Struktur für die situationsorientierte Werkerführung hinsichtlich der Kriterien einer effizienten Speicherung und einer Vorberechnung der Komplexität im Betrieb. Die algorithmische Verarbeitung des Strukturelements ist in Abschnitt 5.3.3 (S. 109 ff.) beschrieben. Die Kombination der Referenzierung von äquivalenten Fügevorgängen und der Hierarchisierung durch Subgraphen ist in Abbildung 42 dargestellt. Die Referenzierung erlaubt die hierarchische Detaillierung des Montagegraphen über mehrere Ebenen hinweg und innerhalb bestehender Ebenen.

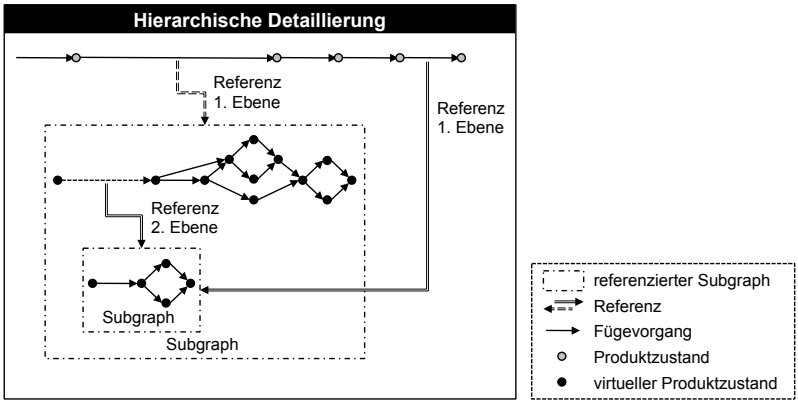


Abbildung 42: Detaillierung von Ablaufstrukturen durch hierarchische Referenzierung auf Subgraphen

5.2.3 Datenmodell

5.2.3.1 Allgemeines

Informationen zur Planung und zur Steuerung von Montagesystemen sind in einer geeigneten Weise abzubilden. Zu diesem Zweck sind die benötigten Klassen, die Entitäten der Montageumgebung und deren Beziehungen in Anlehnung an die im vorangegangenen Abschnitt 5.2.2 (S. 79 ff.) sowie deren wesentliche Attribute abzubilden. Die Forderung nach einer effizienten informationstechnischen Verarbeitung des Montageprozesses im Allgemeinen und der Montageanweisungen im Besonderen bedingt deren strukturierte Speicherung. Zugleich soll die Wahl der durch das System nutzbaren Ausgabemedien dadurch nicht eingeschränkt werden. Hierzu sind ein Datenformat und eine Datenstruktur zu implementieren, welche mit geringem Aufwand zu bearbeiten und zu erweitern sind.

Ausgehend von diesen grundlegenden Anforderungen wird die Datenstruktur in Anlehnung an bestehende wissenschaftliche Arbeiten in die Basisklassen *Produkt*, *Prozess* und *Ressourcen* unterteilt (STEINWASSER 1997, JONAS 2000, RUDOLF 2007). Abbildung 43 zeigt den grundlegenden Zusammenhang dieser Basisklassen.

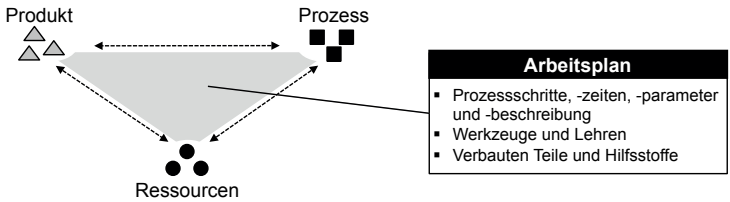


Abbildung 43: Grundlegender Zusammenhang der Basisklassen Produkt, Prozess und Ressourcen nach KLAUKE (2002)

Die Basisklasse *Produkt* beschreibt einerseits die Struktur eines zu fertigenden Produkts, welches z. B. modular dargestellt werden kann. Andererseits bestimmt sie die Charakteristika der Bestandteile/Bauteile, wie z. B. Kosten oder Masse von Baugruppen und Toleranzangaben. Alle Montagevorgänge, welche direkt oder indirekt zum Montagefortschritt beitragen, werden anhand der Basisklasse *Prozess* verwaltet. Ähnlich der Produktstruktur werden die Montagevorgänge hierarchisch auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen abgebildet. Montageanlagen und deren Bestandteile werden in der Basisklasse *Ressourcen* verwaltet.

Zur Abbildung der Planungs- und Steuerungsinformationen in der Datenstruktur wird eine hierarchische Gliederung genutzt, welche die Elemente in einen logischen Zusammenhang stellt. Durch diese Basisklassen können die Inhalte der Planung und Steuerung vollständig abgebildet werden und es ist eine Austauschbarkeit mit angrenzenden Systemen der Fabrikumgebung gewährleistet. Die offene und erweiterbare Gestaltung des Datenmodells erlaubt die Abbildung der Elemente der Fabrik- und Montageumgebung auf unterschiedlichen Detaillierungsebenen.

5.2.3.2 Abbildung von Produktzuständen

Im Verlauf der Montage stellt der Zustand des Werkstücks das führende Steuerungskriterium dar. Hierbei ist zwischen produkt- und auftragsrelevanten Größen zu unterscheiden. Letztere finden in den übergeordneten Planungssystemen Verwendung und werden hier nicht im Detail betrachtet. Produktrelevante Größen sind Informationen u. a. über den aktuellen Zustand sowie über vergangene und zukünftige Prozesselemente, welche die Montage beeinflussen (z. B. Toleranzen, zeitliche Restriktionen und Qualitätsmerkmale). Abbildung 44 zeigt die grundlegenden Elemente des Datenmodells der Struktur zur Repräsentation von Monta-

gesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung in UML-Notation (Unified Modeling Language). Die Zusammenhänge zwischen den Klassen und in der Umsetzung davon abgeleiteten Objekten sind anhand der Assoziationen Vererbung, Aggregation und Komposition veranschaulicht. Die Indikation der Kapselung von Attributen und Methoden sei in dieser Darstellung vernachlässigt.

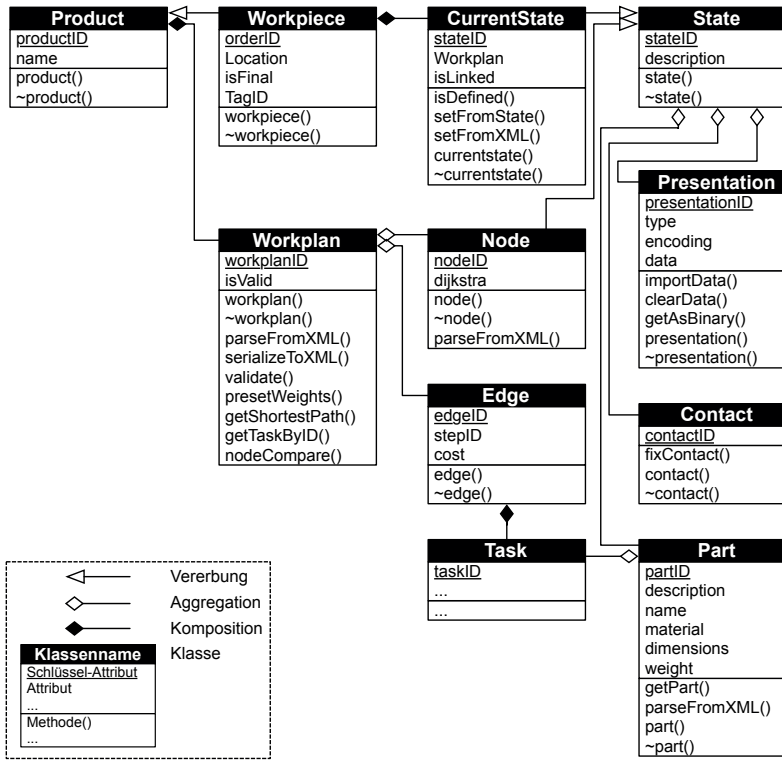


Abbildung 44: Datenstruktur zur Abbildung des Produktzustands in UML-Notation (Unified Modeling Language)

Ausgehend von dem zu fertigenden Produkt (Klasse *Product*) als Wurzelklasse wird im Verlauf der Montage ein Werkstück (Klasse *Workpiece*) in einem aktuelen Zustand (Klasse *CurrentState*) bearbeitet. Der aktuelle Zustand leitet sich aus den möglichen Zuständen (Klasse *State*) des Werkstücks ab, welche exemplarisch durch die darin enthaltenen Darstellungen, Kontakte und Teile (Klassen *Presentation*, *Contact* und *Part*) bestimmt sind. Diese möglichen Zustände ver-

erben ihre Attribute und Methoden an entsprechende Knoten (Klasse *Node*) in dem Arbeitsplan (Klasse *Workplan*). Der Arbeitsplan ist mit dem Produkt assoziiert und setzt sich aus Knoten und Kanten (Klasse *Edge*) zusammen. Die Kanten des Arbeitsplans beinhalten die für den Übergang auszuführende Montageoperation (Klasse *Task*). Letztere wiederum ist unter anderem mit den entsprechenden Teilen assoziiert. Überdies hinaus sind im Rahmen der softwaretechnischen Umsetzung Zusammenhänge, Attribute und Methoden notwendig, welche über die Darstellung in Abbildung 44 und die vorangegangenen Erläuterungen hinaus gehen. Beispielsweise seien hier die Detaillierung der hierarchischen Strukturen und die Referenzierung von Montagevorgängen oder die Differenzierung eines Fügevorgangs in dessen (primäre) Montageoperation und (sekundäre) Zusatzaktionen sowie deren Bezug auf das einzubeziehende geführte Bauteil (Klasse *ActionPart*) genannt.

Die Hinterlegung der Zustände des Werkstücks im vorgeschlagenen Datenmodell kann in unterschiedlichem Detailierungsgrad und je nach Anforderung des Anwenders erfolgen. Mit den angebotenen Detailierungsgraden und deren hierarchischer Detaillierung geht ein entsprechender Informationsgehalt der Struktur einher (vgl. Abbildung 18, S. 39). Allen gemein ist die Möglichkeit der expliziten Modellierung in einer Auszeichnungssprache (z. B. XML) und der Überführung in eine objektorientierten Arbeitsplan.

5.2.3.3 Abbildung von Fügevorgängen

Die Erzeugung von Anweisungsinformationen aus Montagevorgängen bedingt, dass hierfür notwendigen Schritte formal abgebildet sind. Um eine entsprechende Zuweisung zu den zur Verfügung stehenden Ressourcen zu gewährleisten, werden die für den Montageprozess notwendigen einzelnen Vorgänge inhaltlich nach bestehenden Normen und Richtlinien spezifiziert. Als Grundlage für die Beschreibung von Fertigungsprozessen werden die Norm DIN 8593-1 (2003) beziehungsweise die entsprechenden assoziierten Normen (DIN 8589 (spanende Verfahren), etc.) bedarfsorientiert herangezogen. Die für den Montageprozess notwendigen Vorgänge können auf Basis dieser Beschreibung unabhängig von den verfügbaren Ressourcen dokumentiert werden. Dies wird durch technologie- und prozessspezifische Informationen (z. B. Sicherheitshinweise, Werkzeughinweise) ergänzt. Die Begründung des Datenmodells auf einer standardisierten Beschreibung hat einerseits einen geringen Aufwand für die Umplanung von Prozessen (z. B. je nach Werkzeugverfügbarkeit) zur Folge. Andererseits bietet

die Struktur die Grundlage für die Anpassung des gesamten Montageablaufs, welche beispielsweise durch zusätzliche Arbeitsschritte bei einer unzureichenden Produktqualität (z. B. Nacharbeit) oder situations- und werkerbedingten Reihenfolgeänderungen notwendig werden kann. Letzteres ist nicht Teil des Betrachtungsraums der vorliegenden Arbeit.

Aufbauend auf einer gegebenen Struktur nach der Norm DIN 8593-1 (2003) nehmen Vorgänge der Montage eine Sonderstellung ein. Um dieser in ihren Ausprägungen gerecht zu werden, werden die dem Fügen zuzuordnenden Vorgänge anhand der Empfehlungen der Richtlinie VDI 2860 (1990) bestimmt. Jedes vorgangsbeschreibende Element (Montageprimitiv) enthält als Bestandteile die in Abschnitt 5.2.2.3 (S. 82 ff.) als notwendig deklarierten Angaben zur Fügeverbindung (insb. die Benennung der Montageoperation, die Ausführungsorientierung (Orientierungsgrad) und die Ausführungspositionierung (Positionierungsgrad)). Die Fügeverbindung verweist auf das geführte Bauteil und die zugehörige Basisbaugruppe bzw. das zugehörige Basisbauteil. Als optionale Bestandteile können Zusatzaktionen (z. B. Einfetten) oder Restriktionen für den Fügevorgang abgebildet werden.

Ausgehend von dem in Abschnitt 5.2.2.5 (S. 88 ff.) hergeleiteten Komplexitätsmaß werden jeder Montageoperation und der damit assoziierten Kante Kosten für die Ausführung des Vorgangs zugerechnet. Diese Kosten sind als Attribut eines Objektes der Klasse *Edge* (siehe Abschnitt 5.2.3.2, S. 100 ff.) hinterlegt und gehen in die algorithmische Bestimmung der optimalen Montagesequenz ein. Die Umsetzung des Modells im Rahmen der manuellen Montage wird in Bezug auf die Abbildung von Fügevorgängen zur Anwendung gebracht.

5.2.3.4 Abbildung von Ressourcen

Als Voraussetzung für die adaptive Planung und Steuerung von Abläufen müssen neben den Produkten und den Prozessen auch die zur Verfügung stehenden Ressourcen formal beschrieben und modelliert werden. Im Datenmodell werden hierunter sowohl die jeweiligen Montageanlagen mit den dazugehörigen Komponenten als auch die zur Verfügung stehenden Werker erfasst. In Anlehnung an bestehende Datenmodelle gliedert sich die Ressourcendarstellung von Montageanlagen in eine Beschreibung der Betriebsmittel mit den dazugehörigen Komponenten und deren strukturellen Aufbau mit den dazugehörigen technischen Merkmalen (z. B. Leistungsdaten). Darüber hinaus werden die Fähigkeiten über die technisch durchführbaren Montageprozesse im Modell hinterlegt. Als

Voraussetzung für eine effiziente Planung können zusätzlich organisatorische und wirtschaftliche Informationen (z. B. Verbrauchskosten) im Ressourcenmodell hinterlegt werden. Bezug nehmend auf die auszuführenden Vorgänge in einem Montageprozess sind für die Generierung von Montageanweisungen vor allem die Verfügbarkeit der eingesetzten Ressourcen von Bedeutung. Diese Verfügbarkeiten werden anhand bestehender Normen und Richtlinien hinterlegt. Im Zusammenhang mit technologie- und geometriebezogenen Daten erlaubt die hierarchische Struktur eine Beschreibung der Ressourcenverfügbarkeit bis auf die Werkzeugebene. Im Rahmen des Ressourcenmodells können Werkerprofile und die zugehörigen Kenndaten für manuelle Arbeitsplätze (z. B. Kraftaufwände, Schutzeinrichtungen) ebenfalls gespeichert werden. Mithilfe der im Ressourcenmodell hinterlegten Informationen können somit die für die Montage anzuwendenden Betriebsmittel unter Berücksichtigung wirtschaftlicher Kriterien ausgewählt werden. In Kombination mit den produkt- und prozessspezifischen Informationen stehen einem Montagesystem somit alle Informationen für die situationsorientierte Anweisungsgenerierung in Abhängigkeit des Produktzustands zur Verfügung.

Lagersystemen und der Bereitstellung von Bauteilen/-gruppen kommt in der Montage eine besondere Bedeutung zu. Hierfür sind in dem Datenmodell Schnittstellen und Konfigurationsprofile vorhanden, welche die strukturierte Modellierung anhand einer einheitlichen Klasse *iStorage* ermöglichen. Im Sinne der Anwendung der Graphenstruktur kann damit sowohl die absolute Bereitstellung von Bauteilen/-gruppen (Verfügbarkeit) als auch deren zeitgerechte Lieferung an den Montagearbeitsplatz abgebildet werden. Eine aktive Einbeziehung von Lagersystemen als Einflussgröße des Montageassistenzsystems ist anhand entsprechender Schnittstellen vorgesehen.

5.2.3.5 Zusammenführung der Datenstrukturen

Die Daten und Parameter der erläuterten Basisklassen *Produkt*, *Prozess* und *Ressourcen* werden zur kontext- und anwendungsunabhängigen Verwendbarkeit in einer Datenstruktur zusammengeführt und abgebildet. Es ist angebracht, für die Modellierung und den folgenden Datenaustausch zwischen Systemen der Fabrikumgebung ein einheitliches Datenformat auszuwählen. Hierfür bieten sich sowohl STEP als auch XML (Extensible Markup Language) an. Die Möglichkeit zur Abbildung von prozess- und ressourcenrelevanten Daten ist im Standard STEP nicht ausreichend im Kontext dieser Arbeit (ZAEH & RUDOLF 2005). Die-

ses Defizit und der Vorteil der weiten Verbreitung von XML in den Werkzeugen der Digitalen Fabrik führten zur Entscheidung zur Nutzung von XML.

Die Grundlage der Anwendung der Datenstruktur bildet eine der Anwendung entsprechende XML-Schemadefinition. Die für die Planung und Steuerung des Systems benötigten Daten können medienunabhängig über dezentrale (z. B. produktgebunden) oder zentrale (z. B. drahtgebundene Netzwerke) Infrastrukturen übermittelt werden. Die *Extensible Markup Language* (engl. für „erweiterbare Auszeichnungssprache“) ist eine Auszeichnungssprache zur Darstellung hierarchisch strukturierter Daten. Die Spezifikation definiert eine Metasprache, auf deren Basis durch strukturelle und inhaltliche Einschränkungen anwendungsspezifische Sprachen definiert werden können.

5.3 Mechanismen und Abläufe

5.3.1 Allgemeines

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die strukturbestimmenden Elemente zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung eingeführt und beschrieben. Die Elemente stehen zum einen durch die im Datenmodell abgebildeten Assoziationen in Zusammenhang, zum anderen wird durch die Anwendung von Mechanismen und algorithmischen Abläufen eine Interaktivität hergestellt. Die Mechanismen können den zwei Anwendungsphasen *vor dem Betrieb* und *im Betrieb des Montagesystems* zugeordnet werden. Vor dem Betrieb ist die Ableitung der Graphenstruktur aus Montagevorranggraphen und die Vorverarbeitung zur Vorbelegung durchzuführen. Im Betrieb können die Mechanismen in der Gruppe der Abläufe zur Bestimmung der situationsorientierten Montagesequenz zusammengefasst werden. Der Ablauf ist in Abschnitt 5.3.2 gesamthaft beschrieben und in Abbildung 47 veranschaulicht.

5.3.2 Ableitung der Graphenstruktur aus Montagevorranggraphen

Die in Abschnitt 5.2.2 (S. 79 ff.) beschriebene Struktur des Montagegraphen ist aus den gegebenen Daten konventioneller Montagevorranggraphen (siehe Abschnitt 3.2.2, S. 24 ff.) abzuleiten. Der schematische Ablauf dieses Vorgangs ist in Abbildung 45 visualisiert. Die Reduktion der Anzahl der Vorrangbeziehungen zwischen den Fügevorgängen bezüglich der geometrischen und der mechani-

schen Machbarkeit ist ein in der Literatur hinreichend diskutiertes und für den bestehenden Anwendungsfall gelöstes Problem (vgl. HOMEM DE MELLO & SANDERSON (1991B)). Diese Reduktion ist im Rahmen der Montageplanung zu bearbeiten und wird für die vorliegende Arbeit als erfüllt angesehen. Ergebnis ist ein reduzierter Vorranggraph in konventioneller Darstellung, welcher die Grundlage für die Ableitung der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung bildet.

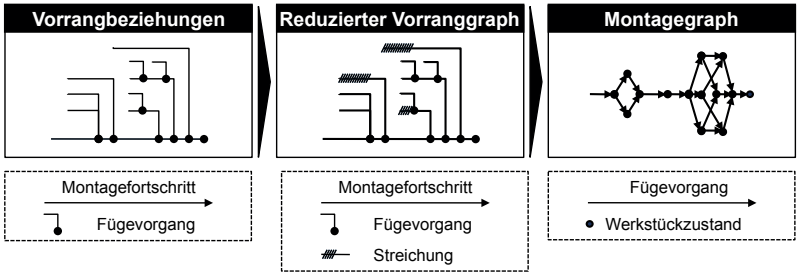


Abbildung 45: Ableitung des Montagegraphen durch die Reduktion der Vorrangbeziehungen und die Konvertierung in eine gerichtete Graphenstruktur

Ausgehend von den drei Grundstrukturen (vgl. Abschnitt 3.2.2.1, S. 24 ff.) können Abbildungsregeln zur Transformation des reduzierten Vorranggraphen in den Montagegraph abgeleitet werden. Diese gelten für sequenzielle Übergänge als einfache Struktur (Abbildung 46, links) und wahlfreie (parallele) Übergänge als Kombination von Verzweigung und Zusammenführung (Abbildung 46, rechts).

Die in einfachen Strukturen enthaltene Beschreibung der Teilverrichtung entspricht einem Fügevorgang $o_{(i,j)}$. Dessen Ausführung erzeugt aus dem Produktzustand p_i den im Rahmen der Transformation zu generierenden Produktzustand p_j. Entsprechend ist für das Ausführungsergebnis der folgenden Teilverrichtung (TV j) ein abschließender Produktzustand p_{j+1} anzuschließen. Die Überführung der obigen Interimsabbildung (Abbildung 46, jeweils Mitte) in die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung ist ersichtlich. Die Transformation von wahlfreien Übergängen in Vorrangstrukturen gestaltet sich im ersten Schritt ähnlich dem Vorgehen bei einfachen Strukturen. Teilverrichtungen und deren Verknüpfungen werden hinsichtlich der ausführungsbedingten Eigenschaften in Fügevorgänge und Produkt-

zustände differenziert. Die Struktur in dem gesuchten Montagegraph resultiert aus den möglichen Kombinationen der äquivalenten Fügevorgänge. Eine Reduktion der Graphenstruktur auf Grundlage der Referenzierung dieser äquivalenten Fügevorgänge kann sich anschließen (vgl. Abschnitt 5.2.2.6, S. 96 ff.). Komplexere Strukturen in Graphen können anhand von Kombinationen der grundlegenden Elemente abgebildet werden. Die Transformation des vollständigen Vorranggraphen hin zu der Struktur des Montagegraphen erfolgt durch dessen Traversierung, welche Zwischenzustände erzeugt und diese bei bestehenden Vorgängerzuständen $Pre(p_i)$ anhand des entsprechenden äquivalenten Fügevorgangs $o_{(i,j)}$ verbindet.

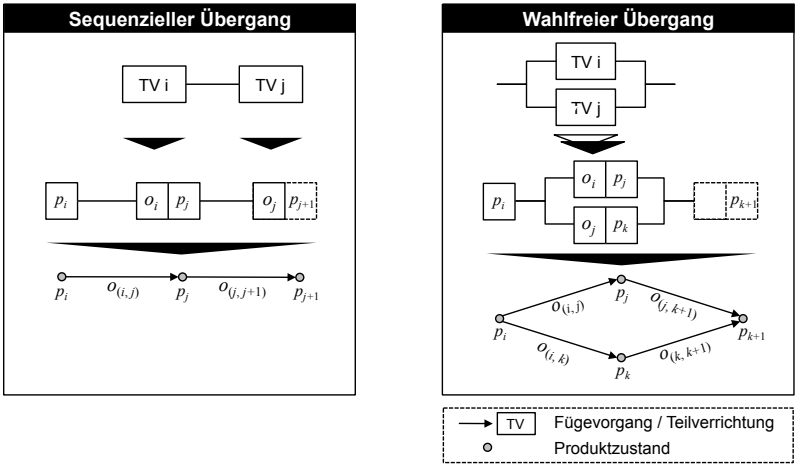


Abbildung 46: Abbildungsregeln für sequenzielle Übergänge und wahlfreie Übergänge in Montagegraphen

Im Anschluss an die textuelle und bildhafte Erzeugung der Graphenstruktur für den Montageablauf durch ein geeignetes Montageplanungssystem (*Montageoperationen*) und die Abbildung anhand des Datenmodells für die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung werden die verfügbaren Informationen zu den Fügevorgängen im Rahmen der *Dekomposition* auf den höchsten Detailierungsgrad nach der Richtlinie VDI 2860 (1990) überführt. Dies resultiert in der Zerlegung der Montageoperationen in Montageprimitive als Voraussetzung für eine werkerorientierte Regulierung des Informationsgehalts je Anweisung. In Abhängigkeit der in der Graphenstruktur hinterlegten Komplexität der Montageoperationen kann in diesem Zuge eine

Menge an Anweisungen für die auszugebende Montageoperation bestimmt werden. Diese Menge orientiert sich an der Konstante *v* des wissensbasierten Beanspruchungsfaktors (vgl. Abschnitt 5.2.2.5, S. 88 ff.), welche abhängig vom individuellen Werker ist und dessen Vertrautheit mit dem System bzw. dem zu montierenden Produkt beinhaltet. Die Konstante geht im Betrieb eines Systems in der Integration als Vorbelegung der Graphenstruktur ein. Diese findet in dem heuristischen Element zur Ermittlung der situationsorientierten Montagesequenz Anwendung.

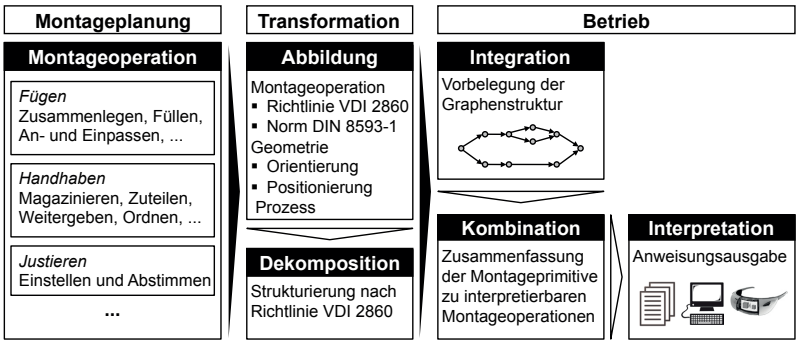


Abbildung 47: Ablauf der Abbildung von Fügeprozessen in der situationsorientierten Werkerführung

Die darauf aufbauende Phase *Kombination* beinhaltet den Vorgang, welcher die Menge an Anweisungen auf ein abstraktes, höheres Niveau überführt. Dieser Vorgang der Kombination kann in zwei Ausprägungen implementiert werden:

- Horizontal,
  z. B. vierfache Ausführung von „Drehe eine Schraube des Typs M5 ein“ → „Drehe 4 Schrauben des Typs M5 ein“, oder
- Vertikal,
  z. B. Transformation von Richtlinie VDI 2860 (1990) nach Norm DIN 8593-1 (2003).

In Abhängigkeit der zu Grunde gelegten Daten aus den Quellsystemen der Montageplanung sind die Anweisungsinformationen zu einem Fügevorgang aufgrund der offenen Struktur des Datenmodells dergestalt, dass diese multimodal angepasst und ausgegeben werden können (*Interpretation*).

5.3.3 Vorverarbeitung der Graphenstruktur

Die vielschichtigen Einflusselemente der Ermittlung der situationsorientierten Montagesequenz sind in effizienten Algorithmen während der operativen Montage (Online-Algorithmus) umzusetzen. Zugleich jedoch bietet sich in einem dem Montageprozess vorangehenden Vorgang der Vorverarbeitung der Graphenstruktur die Möglichkeit, Einflüsse anhand heuristischer Bestandteile in die Struktur einzubringen. Ausgehend von der grundlegenden Problemstellung der Ermittlung kürzester Wege auf Graphen erlaubt dies die Verkürzung der Laufzeit des auf die Struktur angewandten Algorithmus zur Bestimmung der situationsorientierten Montagesequenz. Die Einflüsse auf die Ermittlung der Montagesequenz entstammen den Kontextbegriffen, welche in einem Zusammenhang mit der Situation des Werkers stehen (vgl. Abschnitt 4.4, S. 68 ff.). Eine heuristische Abbildung in der Graphenstruktur erfolgt wie in Tabelle 8 erläutert. Es ist zu erwarten, dass die Abbildungen in *Referenzierung* und *Vorbelegung* in einem deutlichen Reduzierungseffekt auf die Laufzeit des Algorithmus resultieren werden. Die verbleibenden Einflusselemente werden auch im Rahmen der Vorverarbeitung der Graphenstruktur abgebildet. Sie stellen jedoch mehrheitlich statische Elemente im Verlauf der operativen Montage dar.

Tabelle 8: Einflusselemente der Ermittlung der situationsorientierten Montagesequenz und deren heuristische Abbildung im Rahmen der Vorverarbeitung der Graphenstruktur

Kontext	Einflusselement	Heuristische Abbildung
Infrastrukturkontext	Verfügbarkeit von Ressourcen	Reduzierung der Struktur
Systemkontext	Verfügbarkeit von Bauteilen und -gruppen	Abbildung in Anlieferzeit $t_{Parts(o)}$
	Bereitschaft von Ressourcen	Abbildung in Vorgabezeit t_{SvZ}
Domänenkontext	Vertrautheit des Werkers	Abbildung in t_w
	Bereitschaft des Werkers	Abbildung in f_k
	Hierarchische Strukturen im Montageplan	Referenzierung, Vorbelegung
Physikalischer Kontext	Komplexität von Fügevorgängen	Vorbelegung
	Äquivalenz von Fügevorgängen	Referenzierung

Hierarchische Strukturen im Montageplan werden, wie in Abschnitt 5.2.2.6 (S. 96 ff.) beschrieben, referenziert. Dieser Vorgang findet vor der heuristischen Vorbelegung statt, da auf diese Weise die Berechnung der Schätzwerte nur einmal zu erfolgen hat. Die Komplexität entsprechender Strukturen ist durch den Algorithmus zur Laufzeit bei Anfrage nur ein Mal zu berechnen. Die Vorbele-

gung der Aufwände richtet sich nach dem Verfahren, welches für die Komplexität von Fügevorgängen zur Anwendung kommt. Die hierarchischen Strukturen werden anhand einer topologisch sortierten Liste der Graphen und Subgraphen im Datenobjekt *Workplan* hinterlegt.

Die Komplexitätselemente einer Montageoperation bilden die Grundlage für die Schätzfunktion des Algorithmus zu Ermittlung der situationsorientierten Montagesequenz. Nach BECKSTEIN (2003) wird eine Schätzfunktion h als zulässig und optimistisch bezeichnet, falls bezüglich der tatsächlichen Distanz h^*

$$\forall i: h(i) \leq h^*(i) \tag{14}$$

gilt. Somit kann die Distanz von einem Knoten v_i (Zustand p_i) zu dem Zielknoten v_z (Zustand des fertigen Produkts p_z) also nicht überschätzt werden. Dieser Anforderung wird die Schätzfunktion h gerecht, welche die Distanz zu dem Zielzustand anhand des Aufwands eines Vorgangs $o_{(i,i+1)}$ nach SvZ $t_{SvZ}(o_{(i,i+1)})$ bestimmt. Es gilt Gleichung (15):

$$h(i) = t_{SvZ}(o_{(i,i+1)}) \tag{15}$$

Die Heuristik für den Online-Algorithmus wird unter Anwendung eines Dijkstra-Algorithmus abgeleitet. Dabei wird von jedem Zustand p_i die Distanz zu dem Zielzustand p_z (Zustand des fertigen Produkts) auf Basis des Aufwandes eines Vorgangs $o_{(i,i+1)}$ nach SvZ $t_{SvZ}(o_{(i,i+1)})$ berechnet. Die Anlieferzeit der für eine Montageoperation notwendigen Bauteile $t_{Parts}(o_{(i,i+1)})$ wird nicht einbezogen, da diese sich aufgrund der Verfügbarkeit verkürzen kann und somit die Anforderung an die Schätzfunktion nicht mehr erfüllt wäre. Die Kosten des Weges (Distanz) werden in dem Attribut *dijkstra* des jeweiligen Datenobjekts eines Zustandes p_i hinterlegt.

Die Verfügbarkeit von Bauteilen und -gruppen, welche im Rahmen einer Montageoperation notwendig sind, hat einen hohen Einfluss auf die Optimalität der Montagesequenz. Diesem Einfluss wird durch die Einbeziehung der Anlieferzeit $t_{Parts}(o_{(i,i+1)})$ in die Bestimmung der situationsorientierten Montagesequenz im Betrieb Rechnung getragen. Die Anlieferzeit bestimmt sich anhand des Lagersystems, von welchem das notwendige Bauteil oder die notwendige Baugruppe zur Verfügung gestellt wird. Die Anlieferzeit ist in dem Datenobjekt des Lagersystems hinterlegt und bauteilbezogen abrufbar. Im Rahmen der Vorverarbeitung der Graphenstruktur wird für alle notwendigen Bauteile eine Liste der bei dem jeweiligen Lagersystem bereits angefragten Bauteile erstellt und mit einem Zeit-

stempel versehen. Der Einfluss der Anlieferzeit ist exemplarisch in Abbildung 48 dargestellt.

Fügevorgang	Vorgabezeit t_{SvZ}	Anlieferzeit $t_{Parts(o)}$
$o_{(v,\,i)}$	8 s	-
$o_{(i,\,j)}$	6 s	6 s
$o_{(j,\,m)}$	5 s	5 s
$o_{(i,\,k)}$	7 s	3 s
$o_{(k,\,m)}$	6 s	4 s

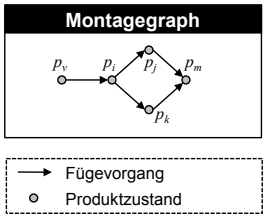


Abbildung 48: Einfluss der Anlieferzeiten von zu montierenden Teilen auf die Montagesequenz (Beispiel)

Der veränderliche Kontext der Montageumgebung macht eine periodische Aktualisierung dieser Verfügbarkeit notwendig. Hierzu wird ein globales Attribut $t_{refreshParts}$ eingeführt, welches die geringste Zeitspanne darstellt, innerhalb derer sich in einem Subgraphen der Graphenstruktur eine Änderung des kürzesten Weges ergeben kann. Hierzu wird die Liste der topologisch sortierten Graphen von unten betrachtet. Zu jedem Subgraphen wird der kürzeste Weg mit der jeweiligen Erhöhung der Distanz zur Senke der Graphenstruktur mit der Maßeinheit der Komplexität (z. B. eine Sekunde) iterativ ermittelt, bis sich eine Änderung des kürzesten Weges im Graphen ergibt. Die kleinste Zeitspanne aller Graphen wird als kritische Zeitspanne $t_{refreshParts}$ gespeichert. Nach Ablauf der kritischen Zeitspanne ist im Rahmen einer wiederholten Abfrage des kürzesten Weges von einem Knoten aus eine erneute Berechnung sinnvoll. Diese Neuberechnung ist immer notwendig, wenn der zurückgegebene Produktzustand nicht Teil des zuvor berechneten Weges ist. Die Vorverarbeitung der Graphenstruktur ist mit den Schritten

- der topologischen Sortierung der Subgraphen,
- der Ermittlung der Heuristik für die Distanz zum Zielknoten sowie
- der Festlegung der kritischen Zeitspanne $t_{refreshParts}$ und der initialen Bestimmung der Verfügbarkeit der Bauteile/-gruppen $t_{Parts}(o_{i,i+1})$

abgeschlossen.

5.3.4 Bestimmung der situationsorientierten Montagesequenz

Ausgehend von der formalen Beschreibung der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung in Abschnitt 5.2 (S. 78 ff.) ist ein dementsprechender Softwaremechanismus zur Ermittlung der in der betreffenden Situation optimalen Montagesequenz herzuleiten. Es wurde gezeigt, dass ein Algorithmus (Online-Algorithmus) auf Grundlage des A*-Algorithmus durch die möglichen Beschleunigungstechniken unter Nutzung einer Schätzfunktion und bestehender Modifikationen der Graphenstruktur für diese Anwendung geeignet ist. Die hierarchischen Elemente (vgl. Abschnitt 5.2.2.6, S. 96 ff.), welche zuvor eine effiziente Speicherung durch Referenzierung ermöglichen, bilden eine hinreichende Voraussetzung zur Ableitung von heuristischen Beschleunigungselementen. Nach Abschluss der Funktionen im Rahmen der Vorverarbeitung der Graphenstruktur kann von einem Startknoten der Graphenstruktur der kürzeste Weg zum Zielknoten ermittelt werden. Im Folgenden werden die Anforderungen an den Online-Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Montagesequenz erörtert und es wird im Anschluss daran anhand einer Modifikationen des A*-Algorithmus der Mechanismus für den Anwendungsfall hergeleitet.

Die grundlegende Anforderung an den Online-Algorithmus ist dessen Korrektheit. Dies bedeutet, dass das Suchergebnis tatsächlich eine Lösung des Suchproblems zu sein hat. Der Algorithmus bestimmt einen Pfad, welcher vom gewählten Startknoten zum Zielknoten führt. Zudem muss der Online-Algorithmus vollständig sein. Existiert eine Lösung des Suchproblems, so muss diese gefunden werden und der Online-Algorithmus genügt der Forderung nach Optimalität. Optimalität heißt, die Lösung des Suchproblems ist der kürzeste Weg vom gewählten Startknoten zum Zielknoten auf der Graphenstruktur. Es ist hinreichend, dass der Online-Algorithmus die Anforderung, optimal effizient zu sein, erfüllt, falls jeder andere vollständige und optimale Algorithmus mindestens die gleiche Anzahl an Knoten bei der Ermittlung des kürzesten Pfads berücksichtigt. Der A*-Algorithmus erfüllt die grundlegenden Anforderungen. Folglich gilt dies auch für den Online-Algorithmus.

Neben den grundlegenden Ansprüchen an den Online-Algorithmus sind bezüglich des Softwaremechanismus hinsichtlich der Gestaltungselemente der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung weitere Einflusselemente zu berücksichtigen. Diese sind in Gestaltungselementen der Graphenstruktur abgebildet (vgl. Abschnitt 5.3.3, S. 109 ff.) und in

der Vorverarbeitung erfasst. Ausgehend davon sind die folgenden Kenngrößen in den Softwaremechanismus einzubeziehen:

- Der aktuelle Produktzustand p und dessen zugehöriger Knoten in der Graphenstruktur v;
- Der Produktzustand p_z des fertiggestellten Produkts und dessen zugehöriger Knoten in der Graphenstruktur z;
- Das Komplexitätsmaß $d(o_{(i,i+1)})$ der Fügevorgänge $o_{(i,i+1)}$;
- Der heuristische Zeitaufwand der Elemente $h(i)$;
- Verfügbarkeiten und Anlieferzeiten $t_{Parts}(o_{i,i+1})$ von Bauteilen und -gruppen;

Bezugnehmend auf das Ablaufdiagramm in Abbildung 49 ist die Entscheidung „$t_{refreshParts}$ unterschritten?“ möglich, nachdem die Ermittlung der Verfügbarkeit und Lieferzeit von Bauteilen mindestens einmal bearbeitet wurde. Dies ist im Rahmen der Vorverarbeitung der Graphenstruktur durchgeführt worden.

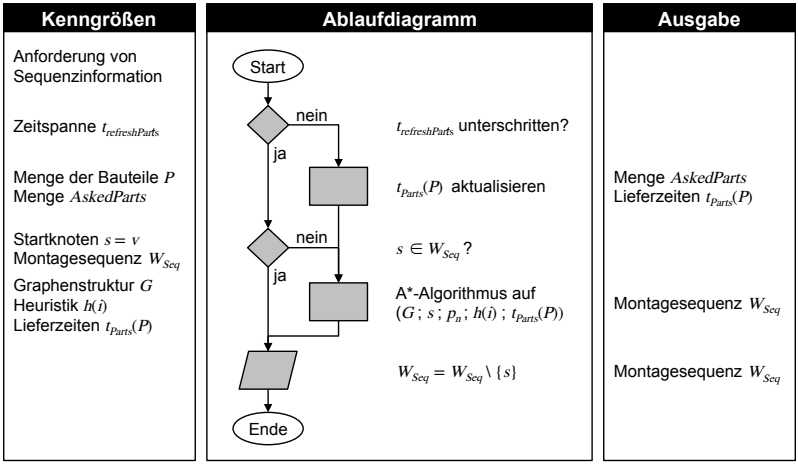


Abbildung 49: Ablaufdiagramm des Softwaremechanismus zur Ermittlung der optimalen Montagesequenz W_{Seq} unter Anwendung des A-Algorithmus*

Die Entscheidung ist aufgrund der möglichen Änderung des Kontextes notwendig (vgl. Abschnitt 5.3.3, S. 109 ff.). Bei einer Überschreitung der kritischen Zeitspanne werden die Lieferzeiten $t_{Parts}(P)$ für die Bauteile neu berechnet. Die Menge *AskedParts* ist eine Untermenge der Menge der Bauteile *P*. Auf diese Weise wird die mehrfache Zuordnung individueller Bauteile zu unterschiedlichen Montageoperationen verhindert.

Ist der durch die Anwendung des Montageassistenzsystems identifizierte Produktzustand *p* bzw. dessen äquivalenter Knoten *v* Teil der bestehenden optimalen Montagesequenz W_{Seq}, so ist keine erneute Berechnung notwendig. Ist eine der Entscheidungen im Ablauf negativ, so wird der A*-Algorithmus unter Beachtung der Heuristik $h(i)$ auf die (Teil-)Graphenstruktur $Post^*(v)$ des Montagegraphen *G* angewendet und es wird eine aktualisierte optimale Montagesequenz W_{Seq} erzeugt. Das Komplexitätsmaß für einen Fügevorgang $o_{(i,i+1)}$ findet im Ablauf des A*-Algorithmus im Sinne des Distanzmaßes Anwendung (vgl. Abschnitt 5.2.2.5, S. 88 ff.). Die Ausgabe der Montagesequenz W_{Seq} erfolgt an das übergeordnete Montageassistenzsystem.

5.4 Zwischenfazit

In den vorangegangen Abschnitten des Kapitels 5 wurde aufbauend auf dem Stand der Erkenntnisse und einer Anforderungsanalyse die Konzeption der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung und der daran gebundene Systementwurf entwickelt. Ausgehend von der grundlegenden Abbildung des manuellen Montageprozesses in Analogie zu der automobilen Navigation wurden die gesamthafte Graphenstruktur und die Elemente des Montageprozesses produktionstechnisch interpretiert und modelliert. Die Modellierung wurde in Anlehnung an bestehende Verfahren des relationalen Modells um Ausführungs- und Zustandsinformationen erweitert und um die Abbildung von Reihenfolgerestriktionen der Fügevorgänge ergänzt.

Aufbauend auf der Strukturmodellierung konnten Komplexitätstreiber für die Ausführung und die Entwicklung eines Maßes für den zeitlichen Aufwand abgeleitet werden. Dabei stellen Einflüsse von Prozess, Produkt und Mensch die Grundlage für drei die Komplexität bestimmenden Dimensionen der Belastung und Beanspruchung dar. Das physische Belastungselement $t_{SvZ}(o_{(i,i+1)})$ eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ spiegelt die anhand der geometrischen und mechanischen Eigenschaften des Fügevorgangs ermittelte zeitliche Dauer wider. Das

wissensbasierte Beanspruchungselement $t_w(o_{(i,i+1)})$ eines Fügevorgangs $o_{(i,i+1)}$ trägt der aus dem Informationsgehalt einer dem Fügevorgang zugehörigen Anweisung $a_{(i,i+1)} = a(o_{(i,i+1)})$ und der daraus resultierenden Komplexität Rechnung. Der kognitive Beanspruchungsfaktor $f_k(o_{(i,i+1)})$ bildet den Einfluss des Aufwands der mentalen Verarbeitung durch den Werker während eines Montagevorgangs ab. Die Zusammenführung der physischen, der wissensbasierten und der kognitiven Dimension resultiert in dem Komplexitätsmaß der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung.

Den bestehenden Entwicklungen Rechnung tragend, wurden die notwendigen Mechanismen und Abläufe zur Vorverarbeitung der Graphenstruktur und der Bestimmung der situationsorientierten Montagesequenz hergeleitet. Letztere greifen im Betrieb (Online-Algorithmus) auf Kenngrößen bezüglich Produktzustand, Komplexität von Fügevorgängen, heuristischen Zeitaufwänden sowie Verfügbarkeit und Anlieferzeit zurück.

Im folgenden Kapitel 6 werden die Umsetzung und Validierung der Struktur und des Konzepts der situationsorientierten Werkerführung in einem Demonstrator beschrieben.

6 Umsetzung und Validierung

6.1 Allgemeines

Das vorangehend veranschaulichte Konzept wird in diesem Kapitel in einen Systemaufbau überführt, dessen Umsetzung im Anschluss daran erläutert und bewertet wird. Die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung wurde als Teil der Kognitiven Fabrik des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Exzellenzclusters 142 *Cognition for Technical Systems - CoTeSys* in einem Demonstrator zur Anwendung gebracht. Der Demonstrator bildete die manuellen Montagetätigkeiten einer Fabrikumgebung ab und war als Einzelarbeitsplatz gestaltet. Die hinsichtlich Kleinteilelager und Montagearbeitsplatz relevanten Systemelemente sind in Abbildung 50 hervorgehoben. Der Begriff *Gesamtsystem* bezeichnet fortan den umgebenden systemtechnischen Teil des Demonstrators der Kognitiven Fabrik, welcher die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung unterstützt.

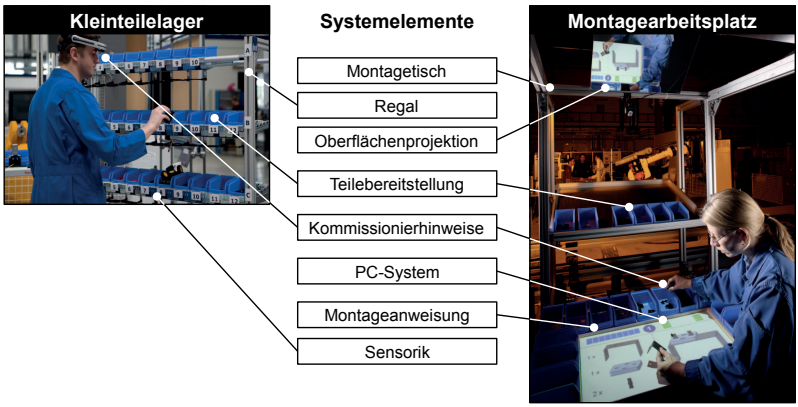


Abbildung 50: Physische Systemelemente des Demonstrators für manuelle Montageassistenz als Teil der Kognitiven Fabrik

In Abschnitt 6.2.1 wird der Systemaufbau vorgestellt. Darauf folgt eine Beschreibung der Module Eingabe, Visualisierung, Anweisungserzeugung sowie des Moduls Datenmodell und Stammdaten in den Abschnitten 6.2.2 (S. 119 ff.)

bis 6.2.5 (S. 125 ff.). Im Anschluss daran wird die Erprobung des Gesamtsystems im Rahmen einer exemplarischen Anwendung erläutert. Diese Erprobung bildet die Ausgangsbasis für eine technische und wirtschaftliche Bewertung im nachfolgenden Abschnitt 6.3 (S. 129 ff.).

6.2 Systemgestaltung und Implementierung

6.2.1 Systemaufbau

Der Systemaufbau als Teil der Montageumgebung, so wie er die Anforderungen der im Kapitel 5 hergeleiteten Struktur unterstützt, ist in Abbildung 51 skizziert. Dieser Systemaufbau ist in Module gegliedert, welche im Ablauf der operativen Werkerführung in Interaktion zueinander stehen.

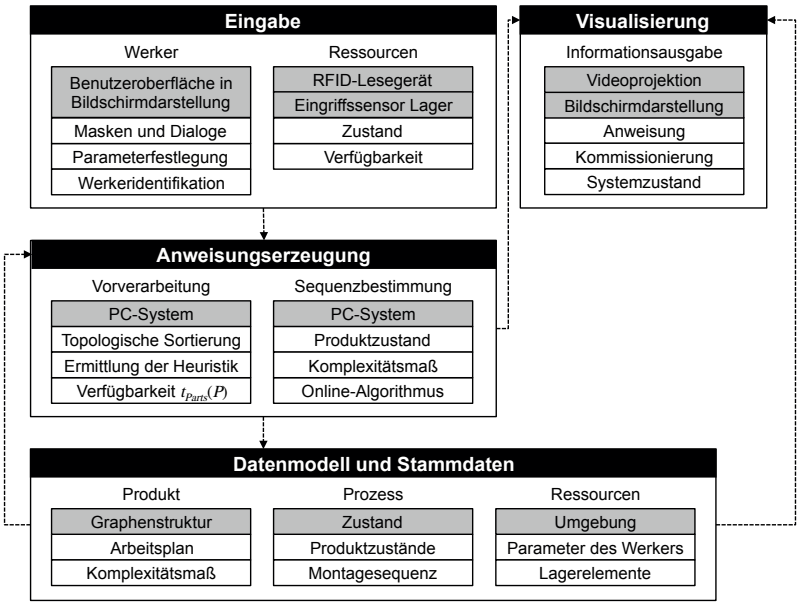


Abbildung 51: Übersicht des Systemaufbaus

Die wesentlichen Module bilden dabei folgende:

- Das Modul *Eingabe* beinhaltet Komponenten und Mechanismen, welche Kenngrößen des Werkers (Domänenkontext) und der Ressourcen (Infrastruktur- und Systemkontext) für die Anwendung bereitstellen. Die Softwaremechanismen werden durch den Werker und über Ressourcenschnittstellen ausgelöst.
- Ein weiteres Modul dient der *Visualisierung* von Anweisungsinformationen und des Systemzustandes. Es beinhaltet alle Komponenten zur darstellenden Abbildung der Informationen zu Produkt, Prozess und Ressourcen in der Montageumgebung.
- Das Modul *Anweisungserzeugung* setzt sich aus den Softwaremechanismen der Vorverarbeitung und der Sequenzbestimmung zusammen. Ausgehend von diesen beiden Komponenten wird auf die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung zurückgegriffen.
- Ein Modul für das *Datenmodell und* die *Stammdaten* von Produkt, Prozess und Ressourcen stellt die operative Planungsbasis zur Verfügung. Der Zugriff der anderen Module erfolgt sowohl lesend als auch schreibend.

Die Module sind auf einer Plattform zusammengeführt und auf einem einzelnen PC-System lauffähig. Der Informationsaustausch erfolgt auf Basis des Standards XML und von Methodenzugriffen auf Klassen.

6.2.2 Modul *Eingabe*

Den Ausgangspunkt für die Interaktion mit dem Demonstrator als Gesamtsystem bildet die Auswahl und Konfiguration des Montageauftrags über die in einer Bildschirmdarstellung angebotenen Masken und Dialoge. Dabei werden die zur Konfiguration notwendigen Daten aus den Dateien

- Produkt-XML,
- Teile-XML,
- Lagerkonfiguration,
- Graph-XML (und zugehöriger Graph-XSD) und
- Unique-ID-Zuordnung

übernommen. Der Werker kann manuell oder in Abhängigkeit der technischen Umsetzung auch über eine Systemschnittstelle identifiziert werden. Hinsichtlich der Anwendung des Online-Algorithmus in der Anweisungserzeugung wird in diesem Zuge die Konstante v_{Werker} zur Festlegung der Vertrautheit des Werkers mit dem zu fertigenden Produkt bestimmt. Weitere Eingabeelemente in den Masken und Dialogen initialisieren den Montagevorgang und bieten Möglichkeiten zum Eingriff in die Ausgabe des Online-Algorithmus hinsichtlich des identifizierten Produktzustands p. Die Maske zur Auswahl des Montageauftrags ist in der folgenden Abbildung 52 dargestellt.

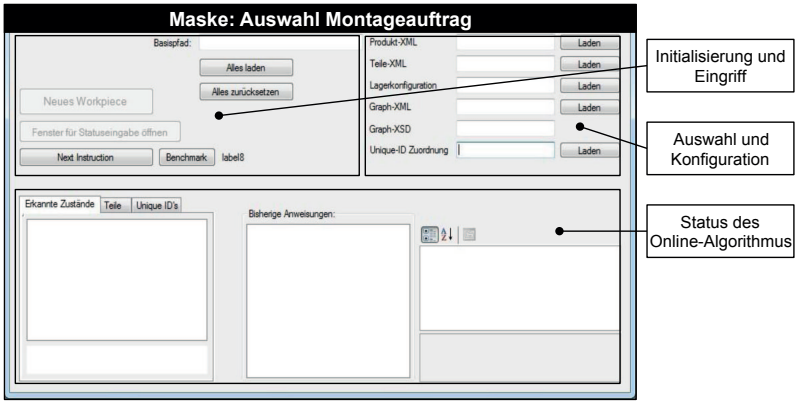


Abbildung 52: Maske zur Auswahl des Montageauftrags durch Konfiguration der entsprechenden Dateien

Darüber hinaus umfasst das Modul *Eingabe* die Masken zur Konfiguration und zur Anpassung der Vorverarbeitung des Montagegraphen als Grundlage für das Modul *Datenmodell und Stammdaten*. Abbildung 53 zeigt den Dialog zur Konvertierung einer Vorranggraphen-Struktur zu einer Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung im Modul *Eingabe*. Das heißt, gegebene Planungsdaten werden zur Anwendung in die notwendige Datei Graph-XML übertragen. Letztere unterliegt den Strukturvorgaben der Datei Graph-XSD.

Die Umsetzung des Demonstrators bietet darüber hinaus die Möglichkeit der Einbindung von Ressourcen. Ein RFID-Lesegerät (vgl. Anhang 9.4) erlaubt sowohl die Identifikation von Bauteilen und -gruppen als auch die Zulieferung von teilgefertigen Produkten zur weiteren Montage am Arbeitsplatz. Hierbei kann der

gültige Produktzustand unmittelbar mit Hilfe der Daten auf dem sog. RFID-Transponder an das Gesamtsystem übergeben werden. Ein Lagersystem und dessen Eingriffssensoren sind integriert. Dies ermöglicht neben der Einbeziehung der Verfügbarkeit von Bauteilen und -gruppen auch die Validierung der korrekt entnommenen Bauteile und -gruppen durch den Werker aus dem Lagerelement. Das Modul *Eingabe* beeinflusst das Modul *Anweisungserzeugung*.

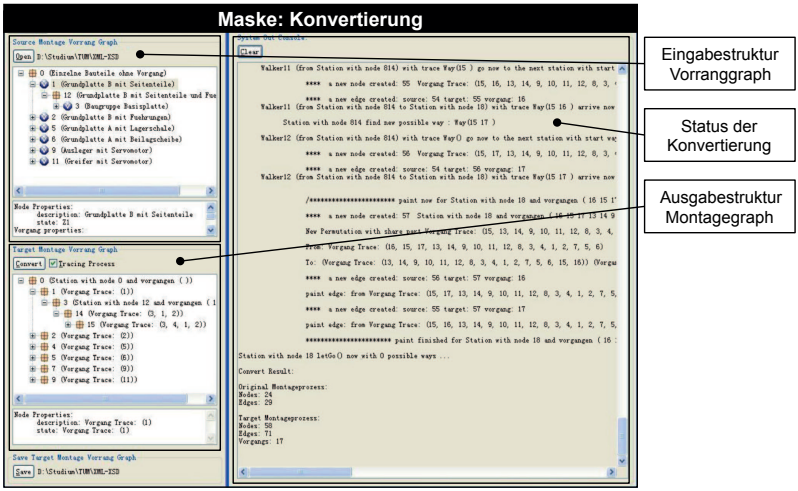


Abbildung 53: Maske zur Darstellung der Konvertierung einer Vorranggraphen-Struktur zu einer Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung

6.2.3 Modul *Visualisierung*

Das Modul *Visualisierung* fasst die Elemente der Informationsausgabe an den Werker zusammen. Dies beinhaltet zum einen die Darstellung von Montageanweisungen als Resultat der Sequenzbestimmung oder von Kommissionierungsanweisungen und zum anderen die Ausgabe hinsichtlich des Systemzustands.

Die Ausgabe von Anweisungen zu Montage und Kommissionierung von hierfür benötigten Bauteilen und -gruppen ist über eine Videoprojektion via Oberflächenspiegel auf die Arbeitsfläche des Montagearbeitsplatzes realisiert. Dies ermöglicht die Kombination von kontaktanaloger Präsentation für die

Kommissionierung bzw. für die Montage und leistet einen Beitrag zur Beleuchtung der Arbeitsfläche. Der Aufbau ist in Abbildung 54 veranschaulicht.

Dieses Moduls ist abhängig von den Benutzeroberflächen in der Bildschirmdarstellung des Moduls *Eingabe*. Mit Hilfe des Moduls *Visualisierung* werden sowohl die Masken und die Dialoge als auch der Systemzustand kommuniziert. Diese auf den tatsächlichen Montageablauf bezogene sekundäre Informationsausgabe muss nicht im unmittelbaren Sichtfeld des Werkers platziert sein.

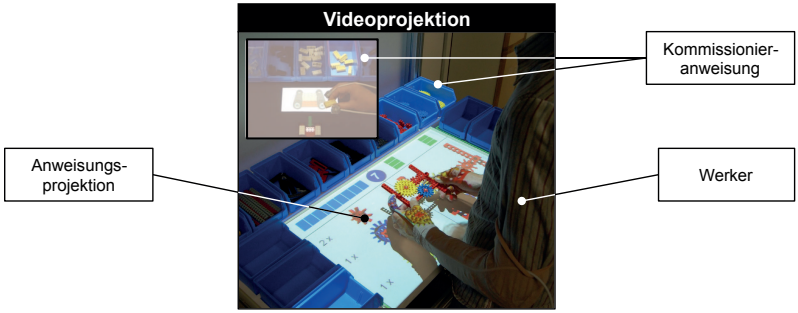


Abbildung 54: Videoprojektion auf die Arbeitsfläche zur Informationsausgabe von Montage- und Kommissionieranweisungen

6.2.4 Modul *Anweisungserzeugung*

Die Vorverarbeitung der Graphenstruktur und die darauf aufbauende Sequenzbestimmung sind die Bestandteile des Moduls *Anweisungserzeugung*. Beide Bestandteile sind Anwendungen auf einem einzelnen PC-System.

Im Rahmen der Vorverarbeitung werden die in Abschnitt 5.3.3 (S. 109 ff.) beschriebenen Abläufe der topologischen Sortierung der Graphenstruktur und der Ermittlung der heuristischen Aufwände sowie die initiale Belegung der Verfügbarkeit $t_{Parts}(P)$ umgesetzt. Dem voran geht die (einmalige) Konvertierung der dem zu Produkt zugehörigen Vorrangstruktur in die entsprechende Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung (vgl. Abbildung 55). Die automatisierte und teilautomatisierte Lösung verläuft anhand der folgenden Phasen:

- Import der Vorrangbeziehungen und Erzeugung einer XML-Struktur unter Anwendung der zugehörigen Vorschrift (XSD-Datei);

- Dekomposition der Montageoperationen zu Montageprimitiven anhand einer Transformation (Anwendung XSL-Datei) in die operative XML-Struktur des Graphen;
- Ablage in oder Abruf aus dem Wissensspeicher (Modul Datenmodell und Stammdaten, Produkt);
- Visualisierung und Validierung der Graphenstruktur durch den Montageplaner;
- Vorverarbeitung der Graphenstruktur im Sinne von Abschnitt 5.3.3 (S. 109 ff.) (Topologie, Heuristik, Verfügbarkeit);

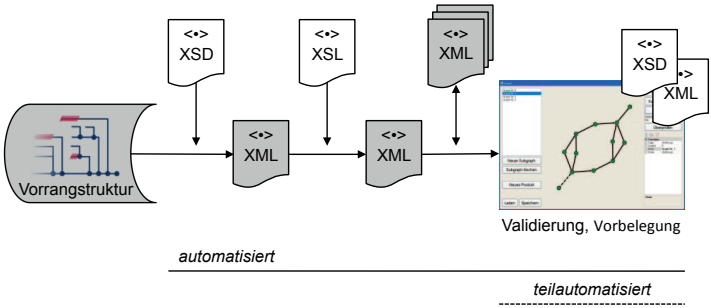


Abbildung 55: Überführung einer gegebenen Vorrangstruktur in die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung (Modul Anweisungserzeugung, Vorverarbeitung)

Die Sequenzbestimmung als Bestandteil des Moduls *Anweisungserzeugung* implementiert die Softwaremechanismen und Abläufe zur Ermittlung der situationsorientierten Montagesequenz (Abschnitt 5.3.4, S. 112 ff.).

Das Funktionsprinzip der situationsorientierten Werkerführung in der Anwendung, welches sich aus der entwickelten Struktur ableitet und diese ergänzt, zeigt Abbildung 56. In der Abbildung gehen die Produkt- und Prozessdaten in Form der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung ein. Auch enthalten die Produktdaten optional den Zustand des Produkts zu Beginn des Montageprozesses an dem betrachteten Arbeitsplatz. Diese Elemente und ihre Verknüpfung werden im Folgenden anwendungsorien-

tiert beschrieben und bilden den Rahmen für die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung.

Der *Produktzustand* wird in Abhängigkeit der Mächtigkeit der am Arbeitsplatz verfügbaren Sensorsysteme und der gewählten Hinterlegung in der Graphenstruktur bestimmt. Er ist zu jeder Zeit das führende Element und legt den zum aktuellen Produktzustand p äquivalenten Knoten v in der Graphenstruktur fest. Im Rahmen der *Prozessbestimmung* wird der über das Modul *Eingabe* festgelegte Produktzustand im Sinne der Struktur identifiziert.

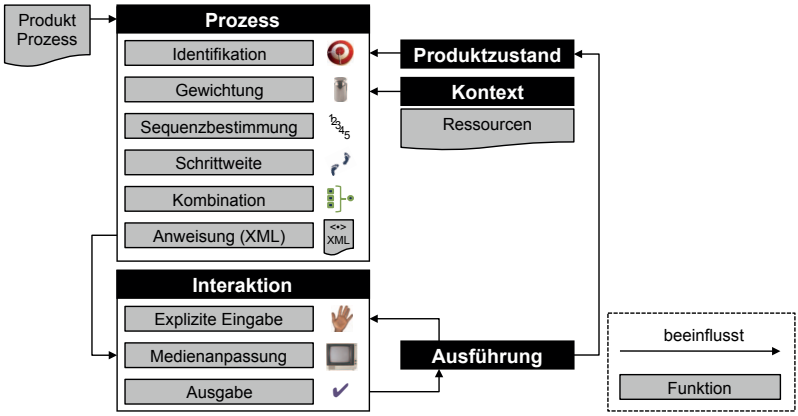


Abbildung 56: Funktionsprinzip (schematisch) der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung

Der *Kontext* des Montageprozesses steht ebenfalls in Abhängigkeit der Mächtigkeit der Sensorsysteme und der Schnittstellen zu der angrenzenden Arbeitsumgebung (z. B. automatische Regalsysteme). Die Umsetzung erfolgt im Modul *Eingabe* (Abschnitt 6.2.2, S. 119 ff.). In Abhängigkeit von der temporalen Gültigkeit (Zeitspanne $t_{refreshParts}$) ist die externe Gewichtung in ihrer Anwendung ergänzend oder ersetzend in Bezug auf die bestehende Gewichtung der Vorverarbeitung der Graphenstruktur. Auf diese Graphenstruktur wird der Online-Algorithmus zur Bestimmung der situationsorientierten Montagesequenz angewandt (Sequenzierung). Das Ergebnis ist eine Folge von Produktzuständen, verknüpft durch Montageprimitive, welche den aktuellen Produktzustand mit dem Zielzustand des Produkts verbindet. Durch die Festlegung des maximalen Informationsgehalts der auszugebenden Arbeitsanweisung kann die Schrittweite auf

obiger Montagesequenz festgelegt werden. Das Ergebnis ist eine Folge von Montageoperationen, welche den aktuellen Produktzustand mit einem in der optimalen Montagesequenz enthaltenen und durch den Werker effizient erreichbaren Produktzustand verbindet. Diese Folge von Montageprimitiven kann im Zuge einer nachgelagerten und von dem Ausgabemedium abhängigen Kombination in eine Informationseinheit sinnvoller und ausführbarer Montageoperationen transformiert werden (Abschnitt 6.2.3, S. 121 ff.).

Das Resultat ist eine Arbeitsanweisung, welche bei der Ausführung das Produkt von seinem aktuellen Zustand in einen durch den Werker effizient erreichbaren Zustand überführt. Die Daten dieser Arbeitsanweisung werden an das mit dem Werker in *Interaktion* stehende Ausgabemedium übertragen und aufbereitet an den Werker ausgegeben. Im Rahmen der Interaktion kann der Werker durch explizite Eingabe die Sicht auf die Montagesequenz hinsichtlich Informationsgehalt und Arbeitsfolge (Sequenzierung) anpassen.

Die *Ausführung* von Montageoperationen durch den Werker führt das Produkt in einen neuen Zustand über. Dieser wird durch das System mittelbar und vom Werker unmittelbar bestimmt. Die Erkennung des neuen Produktzustands und die darauffolgende Bestimmung der Montageoperation schließen den Kreis. Eine Identifizierung des durch die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung festgelegten Zielzustands des Produkts und dessen Bestätigung durch den Werker beenden den Montageprozess.

6.2.5 Modul *Datenmodell und Stammdaten*

Das Modul *Datenmodell und Stammdaten* bildet den Wissensspeicher und die ablauforientierten Zusammenhänge des Gesamtsystems ab. Die Unterteilung in die Elemente *Produkt*, *Prozess* und *Ressourcen* folgt dem in Abschnitt 5.2.3 (S. 99 ff.) erläuterten Ansatz. Die Umsetzung findet objektorientiert in der Programmiersprache C# (vgl. Anhang 9.6, S. 166) statt. Das Element *Produkt* und die Graphenstruktur ist in der Klasse *Product* und deren Verweis auf die Klasse *Workplan* abgebildet. Die hierfür notwendigen Datenquellen und Dateien stellt das Interface *IDataProvider* als Anknüpfpunkt zu dem Modul *Eingabe* zur Verfügung. Das Element *Prozess*, also die Vorhaltung des Produktzustands und der Montagesequenz, ist in der Klasse *State* und deren Verknüpfungen umgesetzt. Die Ressourcen im Sinne des Gesamtsystems werden in der Klasse *Workplace* implementiert. Darin sind die Parameter des individuellen Werkers und die Kon-

figuration der angeschlossenen Lagersysteme enthalten. Eine systemtechnische Übersicht der Umsetzung ist in Anhang 9.5 (S. 164) gezeigt.

6.2.6 Validierung des Online-Algorithmus zur Bestimmung der optimalen Montagesequenz

Die Umsetzung der im vorangegangenen Abschnitt 6.2.4 (S. 122 ff.) beschriebenen Sequenzbestimmung implementiert den in Abschnitt 5.3.4 (S. 112 ff.) detaillierten Online-Algorithmus zur Bestimmung der Montagesequenz auf der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung. Es wurde eine geeignete und gültige Schätzfunktion hergeleitet, welche die effizienten Strukturelemente der Graphenstruktur einbezieht. Der Online-Algorithmus zur Bestimmung der Montagesequenz wird in Gänze den Anforderungen den gerecht.

Im Rahmen der Umsetzung war nachzuweisen, dass der Online-Algorithmus die anwendungsbezogenen Anforderungen hinsichtlich Performanz im Vergleich zu einem entsprechenden Algorithmus ohne Beschleunigungstechniken erfüllt oder übertrifft. Das Gesamtsystem wurde hierzu für die Montage eines Demonstratorprodukts konfiguriert.

Das Demonstratorprodukt für die Montagedurchführung und Validierung des Online-Algorithmus ist der Spielzeugroboter RA-01 (Abbildung 57). Das Produkt eignet sich aufgrund der Unterteilung in einzelne, separat montierbare Baugruppen gut für die vorgestellte Anwendung. Es wurde eine hierarchische Graphenstruktur generiert, welche fünf Baugruppen abbildet.

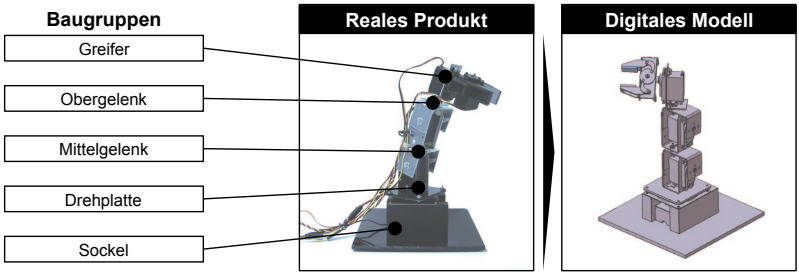


Abbildung 57: Demonstratorprodukt Spielzeugroboter RA-01 für die Erprobung des Online-Algorithmus

Im Rahmen der Vorbereitung werden die produktspezifischen XML- und Textdateien erstellt und durch die Ausführung der Vorverarbeitung aufbereitet. Eine grafische Aufbereitung ist nicht Grundlage der Validierung. Zum Zweck der Vergleichbarkeit wurde ein Vergleichsalgorithmus auf Basis des Dijkstra-Algorithmus implementiert. Der Unterschied zwischen dem Online-Algorithmus und dem Vergleichsalgorithmus ist, dass der Vergleichsalgorithmus keine Heuristik verwendet. Zusätzlich müssen aber, wie bei dem Online-Algorithmus, die Strukturelemente berücksichtigt werden. Der Dijkstra-Algorithmus muss auch die Verfügbarkeiten überprüfen, Bauteile anfordern und auf hierarchischen Graphen operieren können.

Die Algorithmen werden verglichen, indem von jedem Knoten der Graphenstruktur der kürzeste Weg bis zum Zielknoten bestimmt und die Laufzeit gemessen wird. Es wurde die durchschnittliche Laufzeit des Algorithmus auf Grundlage von jeweils 1000 Messdurchläufen bestimmt. In Abbildung 58 ist das Ergebnis der Messung visualisiert. Auf der Ordinate sind die Anzahl noch erreichbarer Knoten der Graphenstruktur zwischen Start und Zielknoten aufgetragen. Die Abszisse des linken Schaubildes stellt die Laufzeit der Algorithmen dar. Die Abszisse des rechten Schaubildes steht für die relative Abweichung der Laufzeit des Online-Algorithmus von der des Vergleichsalgorithmus. Bezogen auf den Startknoten des Graphen, also den Beginn der Montage, ergeben sich folgende Laufzeiten:

- Anzahl an Knoten bis zum Zielknoten: 91
- Laufzeit des Vergleichsalgorithmus: 8891 ms
- Laufzeit des Online-Algorithmus: 6343 ms

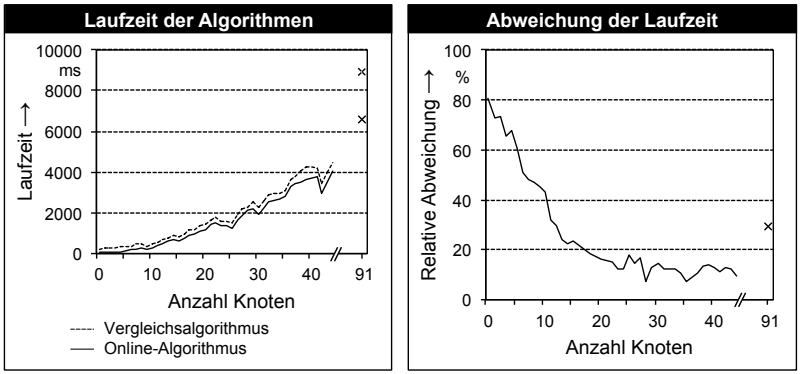


Abbildung 58: Ergebnis der Messungen der Laufzeit der Algorithmen in Abhängigkeit der Anzahl Knoten bis zum Zielknoten

Der entwickelte Online-Algorithmus zeigt in der Anwendung durchgehend Vorteile gegenüber dem Vergleichsalgorithmus. Die deutliche, relative Abweichung der Laufzeit, ausgehend von Knoten, welche nahe am Zielknoten stehen, ist auf die Vorverarbeitung im Rahmen des Online-Algorithmus zurückzuführen. Der Softwaremechanismus wird für den Vergleichsalgorithmus wiederholt ausgeführt. Der absolute Zeitaufwand dieses Softwaremechanismus ist konstant und hat eine umso größere Auswirkung, je geringer die Zeit zur Berechnung des kürzesten Weges ist. Die in Abbildung 58 erkennbare Stabilisierung der relativen Abweichung der Laufzeit für mehr als ca. 20 Knoten zum Zielknoten resultiert aus dem Aufbau der spezifischen Graphenstruktur für das Demonstratorprodukt. Der Ursprung der Abweichung der Laufzeit von 29 % zum Vorteil des Online-Algorithmus liegt in der Graphenstruktur für das Demonstratorprodukt. Der Online-Algorithmus beachtet einen durch die Heuristik ausgewählten Pfad, welcher die Laufzeit deutlich verkürzt.

6.3 Technische und wirtschaftliche Bewertung

6.3.1 Allgemeines

Die Grundlage für eine technische und wirtschaftliche Bewertung der im Rahmen dieser Arbeit entworfenen Konzepte bildet die in Abschnitt 6.2 (S. 118 ff.) beschriebene Umsetzung und Validierung. Ausgehend von den gesammelten Erkenntnissen werden die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung und deren Einbettung in einen Demonstrator zur Montageunterstützung zunächst in Abschnitt 6.3.2 hinsichtlich der technischen Nutzenpotenziale und den gegenüberstehenden Aufwänden bewertet. Im folgenden Abschnitt 6.3.3 (S. 131 ff.) wird die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Dabei werden die erzielbaren Nutzeneffekte den erforderlichen Aufwänden gegenübergestellt. Der Schwerpunkt liegt auf der Anwendung der entwickelten Struktur. Die mittelbar notwendigen technischen Systeme zur Unterstützung der Inbetriebnahme werden zweitrangig betrachtet.

6.3.2 Nutzenpotenziale und Einschränkungen

Aus dem Einsatz der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung und die Begründung von Systemen zur Montageassistenz darauf können folgende Nutzenpotenziale abgeleitet werden:

- Die Suchzeiten des Werkers hinsichtlich Anweisungs- und Kommissionierinformationen werden durch die Möglichkeit der adaptiven multimedialen Anpassung und den Bezug zu den realen Montageobjekten reduziert.
- Hinsichtlich der Montage komplexer Produkte in manuellen Montagesystemen kann von einer Reduzierung der Anlernzeiten der Werker und einer Verbesserung der Lernkurve ausgegangen werden.
- Die Ableitung der situativ-optimalen Montageoperation aus dem aktuellen Produktzustand führt zu einer Vermeidung von ungewollten Demontagetätigkeiten (Nacharbeit).
- Die situations- und kontextabhängigen Anweisungen ergeben einen technologischen Vorteil bei der Präsentation relevanter Informationen. Die

Zeitanteile nicht wertschöpfender Tätigkeiten in sekundären Montagefunktionen werden durch die Kopplung von Montagekontext und primäreren Montageoperationen reduziert.

- Aufgrund der individuellen Anpassung der Informationsdichte und der gesteigerten Informationsversorgung des Werkers wird die ergonomische Gestaltung des Arbeitsplatzes verbessert.

Sowohl die informationstechnische Vorbereitung als auch der operative Betrieb von Systemen zur Montageassistenz auf Basis der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung erfordern einen zusätzlichen technischen Aufwand. Dieser ist den oben genannten Vorteilen gegenüberzustellen.

- Die Anwendung der entwickelten Konzepte bedarf eines gerätetechnisch hohen Aufwandes. Zum einen ist unmittelbare, technische Infrastruktur zur Präsentation für ein System zur Montageassistenz notwendig. Zum anderen bedingen die angrenzenden Systeme der Werkeridentifikation, der Erkennung des aktuellen Produktzustands oder der Beobachtung der produktionstechnischen Peripherie (Kontext) weitere technische Voraussetzungen.

- Die Überführung von Montageplänen in die Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung erfordert eine Implementierung von Schnittstellen, anhand welcher bestehende Datenstrukturen für den operativen Betrieb in der Montageassistenz bereit gestellt werden. Die Abbildung von Varianteninformationen der zu fertigenden Produkte ist hiervon gesondert zu betrachten.

- Die operative Anwendung der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung besitzt ihren größten Nutzen im Rahmen der Montage komplexer und variantenreicher Produkte. Eine Einbringung derartiger Werkerführungsstrukturen in die Fließ- oder Serienmontage weist, über die Unterstützung der Fehlervermeidung hinaus, lediglich geringen Nutzen auf.

6.3.3 Wirtschaftliche Bewertung

Nachfolgend wird anhand einer beispielhaften Wirtschaftlichkeitsrechnung eine quantitative Einschätzung des wirtschaftlichen Nutzenpotenzials getroffen (Tabelle 9). Dazu werden die Kosten- und Nutzeneffekte wie folgt angenommen:

- Die Anschaffungskosten für ein System zur Werkerführung belaufen sich auf 20.500 EUR. Die Nutzungsdauer des Systems wird mit fünf Jahren bei einem kalkulatorischen Zinssatz von 4 % angenommen. Es werden jährliche Kosten für die Wartung in Höhe von 500 EUR angesetzt.

- Es wird angenommen, dass ein Werker in der Montage mit diesem System und im betrachteten Fall um durchschnittlich 10 % schneller als mit konventionellen Unterlagen (hier: papiergebundene Anweisungen) arbeiten kann. Der Montageaufwand einer Stunde komplexer und konventioneller Tätigkeit kann somit in nur 0,9 h = 54 min bewältigt werden bzw. eine Stunde Montageaufwand mit situationsorientierter Werkerführung entspricht einem konventionellen Montageaufwand von 1,11 Stunden.

- Bei einer jährlichen Nutzung des Systems im Umfang von 1.628 Stunden (1-Schicht-Betrieb, 37 Stunden/Woche) können somit 163 Stunden eingespart werden. Eine Gegenüberstellung mit den Lohnkosten eines Montagearbeiters in komplexem Umfeld in Höhe von 35 EUR/Stunde ergeben jährliche Einsparungen von 6.331 EUR.

Jährliche Kosten in Höhe von 5.010 EUR stehen Nutzeneffekten von insgesamt 6.331 EUR gegenüber. In diesem exemplarischen Fall kann sich die Anschaffung des Systems in weniger als 4 Jahren amortisieren.

Wie aus der Beschreibung der Nutzenpotenziale in diesem Abschnitt und aus der Erläuterung der benutzerorientierten Anforderungen (Abschnitt 4.7, S. 74 ff.) ersichtlich wurde, liegt ein starker Fokus auf der Erfüllung einer ergonomisch adäquaten Montageassistenz für den Werker. Die hierbei erreichten Ziele sind im Sinne einer quantitativen Bewertung im Rahmen dieser Arbeit schwer zu beschreiben. Ausgehend von den Erfahrungen aus der Analyse der Studie „Adaptive und situationsorientierte Führung in der manuellen Montage“ (Abschnitt 4.2.2, S. 57 ff.) kann gesagt werden, dass die arbeitswissenschaftlichen Nutzeneffekte sich mittel- und langfristig vorteilhaft realisieren werden.

Tabelle 9: Beispielhafte Wirtschaftlichkeitsrechnung

Investitionskosten			
Zentrale Recheneinheit (PC)		1.500	€
Anzeigegeräte (1 Videoprojektor)		1.000	€
Aufnahmegeräte (2 Videokameras)		2.000	€
Greifregalüberwachung		2.000	€
System zur Werkerführung		14.000	€
Gesamtinvest	**I**	**20.500**	**€**

Jährliche Kosten			
Investitionskosten	I	20.500	€
Nutzungsdauer	T	5	a
Kalkulatorische Abschreibung	A = I/T	4.100	€/a
Kalkulatorischer Zinssatz	i	4	%
Kalkulatorische Zinsen	Z = i x I/2	410	€/a
Instandhaltungskosten	W	500	€/a
Gesamtkosten pro Jahr	**F = A + Z + W**	**5.010**	**€/a**

Jährliche Nutzeneffekte			
Personalkosten Montage	P	35	€/h
Anteilige Zeiteinsparung	e	10	%
Zeiteinsparfaktor bei Einsatz des Systems zur Werkerführung	E = 1/(1 - e)	1,11	h/h
Nutzungsdauer des Systems zur Werkerführung	N	1.628	h/a
Gesamtnutzen durch Einsatz des Systems zur Werkerführung	**S = P x (E-1) x N**	**6.331**	**€/a**

Amortisation			
Amortisationszeit (statisch)	**D = I / (S - F + A)**	**3,78**	**a**

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die zunehmende Ausrichtung der Märkte auf kundenindividuelle Produkte steht dem Aspekt der Rationalisierung durch einen steigenden Automatisierungsgrad und der damit einhergehenden Reduzierung von Flexibilität entgegen. Eine schwankende Nachfrage, eine erhöhte Produktkomplexität und die kurzfristige Änderung von Eigenschaften der Produkte durch den Kunden führen zu kleineren Losgrößen je Produktvariante, unterschiedlichen Herstellungsverläufen und unvorhergesehenen Auftragsänderungen im Produktionsbetrieb. In der Montage wirkt sich dies unmittelbar auf den Werker aus. Dieser vertraut auf sein implizites Wissen und sieht sich gleichzeitig einem erhöhten Suchaufwand, Wartezeiten und einer mangelnden Verfügbarkeit von notwendigen Komponenten gegenüber. Die Folge können Effizienzeinbußen und verdeckte Qualitätsmängel sein.

Die den Werker unterstützenden Montageassistenzsysteme greifen auf die Ergebnisse der Montageplanung zurück. Die zugrundeliegenden Strukturen resultieren in starren, festgelegten Abläufen und Dialogen, welche sich in ihrem zeitlichen Kontext an Durchschnittswerten im Sinne von Systemen vorbestimmter Zeiten orientieren. Die mangelnde Integration der individuellen Handlungen des Werkers in den Assistenzprozess und die beschränkten Kenntnisse des Produktionsumfeldes (Kontext) durch ein System zur Werkerassistenz sind nur schwer mit den individuellen Eigenschaften des Werkers in Einklang zu bringen. Die Unterschiede in der individuellen Leistung von Werkern werden in bestehenden Systemen vernachlässigt. Die Montageassistenzsysteme entsprechen in ihren bisherigen Ausprägungen nicht den Anforderungen hinsichtlich Flexibilität und Führungsbedarf des Werkers in der kundenindividuellen Montage.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ein Konzept und eine Struktur entwickelt, die veranschaulichen, wie die situationsorientierte Werkerführung Arbeitsanweisungen an den Menschen und die produktionstechnische Umwelt anpassen kann und somit eine effiziente Werkerführung bei der Montage von kundenindividuellen und komplexen Produkten gewährleistet. Die vorgestellte Struktur vereint in einer Analogie zur automobilen Navigation die Vorteile der dem Werker eigenen Flexibilität und Fähigkeit zur Nutzung seines impliziten Fachwissens mit den Vorteilen der Reaktivität der zeitnahen und kontextabhängigen Anweisungserzeugung. Mit Hilfe dieser Struktur wird der Werker in einer Art und Weise geführt, welche ihn weder durch Anweisungsdruck überlastet noch durch einen zu hohen Detaillierungsgrad und ein Überangebot an Informationen in der Ausfüh-

rung seiner Tätigkeit behindert. Grundlage und zugleich auszeichnende Merkmale sind

- eine Graphenstruktur, welche die möglichen und sinnvollen Produktzustände und die zu deren Erreichung notwendigen Montageoperationen abbildet,
- ein Komplexitätsmaß, welches die Klassen Produkt und Prozess sowie den Werker bei der Bestimmung der zeitlichen Komplexität von Montagesequenzen einbezieht und
- ein Online-Algorithmus, welcher korrekt, optimal effizient und vollständig eine Montagesequenz ausgibt, welche sowohl das Komplexitätsmaß als auch den Kontext hinsichtlich der verfügbaren Ressourcen beachtet.

Die Machbarkeit und Vorteilhaftigkeit der vorgestellten Struktur wurde im Rahmen eines Demonstrators in der Kognitiven Fabrik nachgewiesen.

Es besteht weiterer Forschungsbedarf zum einen in Bezug darauf, wie eine technische Integration des Werkers in den Montagekontext und in die Anweisungserzeugung gestaltet werden kann. Technische Sensorsysteme müssen hierzu befähigt werden, die unscharfen Informationen der Umwelt und der menschlichen Kognition den Restriktionen und den Merkmalen der Montageplanung und -operation gegenüberzustellen. Auch stellen nicht nur die kundenindividuellen Forderungen des Marktes Anforderungen an die Montage, sondern darüber hinaus der Variantenreichtum der Produkte, welcher der Nachfrage folgt. Die Erweiterung der Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung unter Einbeziehung von variantenspezifischen Informationen ermöglicht die Ausweitung der Anwendung über die Gruppen- und Einzelplatzmontage hinaus.

8 Literaturverzeichnis

ABOWD et al. 1999
Abowd, G. D.; Dey, A. K.; Brown, P. J.; Davies, N.; Smith, M.; Steggles, P.: Towards a Better Understanding of Context and Context-Awareness. In: Gellersen, H.-W. (Hrsg.): Handheld and Ubiquitous Computing: First International Symposium (HUC'99). Karlsruhe, 27.-29. September 1999. Berlin: Springer 1999, S. 304-307. ISBN: 978-3-54066-550-2. (Lecture Notes in Computer Science 1707).

ADAMOU et al. 1998
Adamou, M.; Zerhouni, N.; Bourjault, A.: Hierarchical modeling and control of flexible assembly systems using object-oriented Petri nets. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 11 (1998) 1, S. 18-33.

AMMER 1985
Ammer, E.-D.: Rechnerunterstützte Planung von Montageablaufstrukturen für Erzeugnisse der Serienfertigung. Diss. Universität Stuttgart (1984). Berlin: Springer 1985. ISBN: 3-540-15056-0. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 81).

ARNDT & BAUER 2007
Arndt, K.-D.; Bauer, J.: Arbeitsvorbereitung und Planung. In: Böge, A. (Hrsg.): Vieweg Handbuch Maschinenbau. 18. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2007, S. 1403-1429. ISBN: 978-3-83480-110-4. (Studium und Praxis).

AWF & REFA 1973
AWF, Ausschuß für wirtschaftliche Fertigung e.V.; REFA, Verband für Arbeitsstudien e.V. (Hrsg.): Handbuch der Arbeitsvorbereitung. Teil 1 Arbeitsplanung. Berlin: Beuth 1973.

BALDWIN et al. 1991
Baldwin, D. F.; Abell, T. E.; Lui, M. C. M.; De Fazio, T. L.; Whitney, D. E.: An integrated computer aid for generating and evaluating assembly sequences for mechanical products. IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (1991) 1, S. 78-94.

BARTUSCHAT 1995
Bartuschat, M.: Beitrag zur Beherrschung der Variantenvielfalt in der Serienfertigung. Diss. Technische Universität Braunschweig (1994). Essen: Vulkan 1995. ISBN: 978-3-80278-621-1. (Schriftenreihe des IWF).

BEALE & LONSDALE 2004
Beale, R.; Lonsdale, P.: Mobile Context Aware Systems: The Intelligence to Support Tasks and Effectively Utilise Resources. In: Brewster, S. et al. (Hrsg.): Mobile Human-Computer Interaction – MobileHCI 2004 - 6th International Symposium. Glasgow / Großbritannien, 13.-16. September 2004. Heidelberg: Springer 2004, S. 240-251. ISBN: 3-54023-086-6. (Lecture Notes in Computer Science 3160).

BECKSTEIN 2003
Beckstein, C.: Suche. In: Görz, G. (Hrsg.): Handbuch der künstlichen Intelligenz. 4. Aufl. München: Oldenbourg 2003. ISBN: 978-3-48627-212-3.

BEITER et al. 2000
Beiter, K. A.; Cheldelin, B.; Ishii, K.: Assembly Quality Method: A Tool in Aid of Product Strategy, Design and Process Improvements. Proceedings of DETC 2000. ASME Design Engineering Technical Conferences. Baltimore / USA, 10.-13. September 2000. <http://mml.stanford.edu/publications/2000/2000.asme.dfm.beiter.pdf> - 6. August 2011.

BHANDARKAR et al. 2000
Bhandarkar, M. P.; Downie, B.; Hardwick, M.; Nagi, R.: Migrating from IGES to STEP: one to one translation of IGES drawing to STEP drafting data. Computers in Industry 41 (2000) 3, S. 261-277.

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

BÖHL 2001
Böhl, J.: Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung. Diss. Technische Universität München (2000). München: Utz 2001. ISBN: 3-83160-012-0. (Forschungsberichte *iwb* 150).

BOKRANZ & LANDAU 2006
Bokranz, R.; Landau, K.: Produktivitätsmanagement von Arbeitssystemen. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 2006. ISBN: 978-3-79102-133-1.

BONGULIELMI 2003
Bongulielmi, L.: Die Konfigurations- & Verträglichkeitsmatrix als Beitrag zur Darstellung konfigurationsrelevanter Aspekte im Produktentstehungsprozess. Diss. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (2002). Düsseldorf: VDI-Verlag 2003. ISBN: 3-18315-116-2. (Fortschritt-Berichte VDI Reihe 16 Technik und Wirtschaft 151).

BONNEVILLE et al. 1995
Bonneville, F.; Perrard, C.; Henrioud, J. M.: A generic algorithm to generate and evaluate assembly plans. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): 1995 INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA '95). Paris / Frankreich, 10.-13. Oktober 1995. Los Alamitos / USA: IEEE Computer Society Press 1995, S. 231-239. ISBN: 0-78032-535-4.

BOOTHROYD & ALTING 1992
Boothroyd, G.; Alting, L.: Design for Assembly and Disassembly. Annals of the CIRP 41 (1992) 2, S. 625-636.

BOURJAULT 1984
Bourjault, A.: Contribution à une approche méthodologique de l'assemblage automatisé: Elaboration automatique des séquences opératoires. Diss. Université de Franche-Comté, Besancon / Frankreich (1984).

BRAUN & HAGENMEYER 2005
Braun, M.; Hagenmeyer, L.: Arbeitssysteme zukünftig gestalten. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 1/2, S. 25-28.

BULLINGER 1993
Bullinger, H.-J. (Hrsg.): Systematische Montageplanung. Handbuch für die Praxis. München: Hanser 1993. ISBN: 3-44614-606-7.

BUZACOTT 2002
Buzacott, J. A.: The impact of worker differences on production system output. International Journal of Production Economics 78 (2002) 1, S. 37-44.

CAO & SANDERSON 1998
Cao, T.; Sanderson, A. C.: AND/OR Net Representation for Robotic Task Sequence Planning. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews 28 (1998) 2, S. 204-218.

CHAKRABARTY & WOLTER 1997
Chakrabarty, S.; Wolter, J.: A structure-oriented approach to assembly sequence planning. IEEE Transactions on Robotics and Automation 13 (1997) 1, S. 14-29.

CHAMPAGNE & FAVREL 1984
Champagne, J. P.; Favrel, J.: Elaboration automatique des plans d'assemblage: proposition d'une méthodologie d'approche. L'Onde Electrique (1984) Mars-Avril, S. 142-146.

CHEN 1989
Chen, C. L.: Automatic assembly sequences generation by pattern-matching. IEEE International Conference on Systems Engineering Fairborn / USA, 24.-26 August 1989. <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=48664> - 6. August 2011.

CHEN et al. 2004
Chen, R.-S.; Lu, K.-Y.; Tai, P.-H.: Optimizing assembly planning through a three-stage integrated approach. International Journal of Production Economics 88 (2004) 3, S. 243-256.

CORDELLA et al. 2000
Cordella, L. P.; Foggia, P.; Sansone, C.; Vento, M.: Fast graph matching for detecting CAD image components. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): Proceedings 15th International Conference On Pattern Recognition (ICPR-2000). Barcelona / Spanien, 3.-7. September 2000. Los Alamitos / USA: IEEE Computer Society Press 2000, S. 1034-1037. ISBN: 0-76950-750-6.

CORMEN et al. 2007
Cormen, T. H.; Leiserson, C. E.; Rivest, R.; Stein, C.: Algorithmen - Eine Einführung. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2007. ISBN: 978-3-48658-262-8.

COUTAZ et al. 2005
Coutaz, J.; Crowley, J. L.; Dobson, S.; Garlan, D.: Context is key. Communications of the ACM 48 (2005) 3, S. 49-53.

CUIPER 2000
Cuiper, R.: Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen. Diss. Technische Universität München (2000). München: Utz 2000. ISBN: 3-89675-783-0. (Forschungsberichte *iwb* 143).

DE FAZIO & WHITNEY 1987
De Fazio, T.; Whitney, D.: Simplified Generation of All Mechanical Assembly Sequences. Robotics and Automation 3 (1987) 6, S. 640-658.

DE LIT et al. 1999
De Lit, P.; Rekeik, B.; Pellichero, F.; Delchambre, A.; Danloy, J.; Petit, F.; Leory, A.: A new philosophy for the design of a product and its assembly line. In: Nevins, J. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99). Porto / Portugal, 21.-24. Juli 1999. Piscataway / USA: IEEE Press 1999, S. 381-386. ISBN: 0-78035-704-3

DELLING et al. 2009
Delling, D.; Sanders, P.; Schultes, D.; Wagner, D.: Engineering Route Planning Algorithms. In: Lerner, J. et al. (Hrsg.): Algorithmics of large and complex networks. Berlin: Springer 2009, S. 117-139. ISBN: 978-3-64202-093-3. (Lecture Notes in Computer Science 5515).

DIJKSTRA 1959
Dijkstra, E. W.: A note on two problems in connexion with graphs. Numerical Mathematics 1 (1959), S. 269-271.

DIN 199-1 2002
DIN 199-1:2002-03: Technische Produktdokumentation - CAD-Modelle, Zeichnungen und Stücklisten - Teil 1: Begriffe. Berlin: Beuth 2002.

DIN 8593-1 2003
DIN 8593-1:2003-09: Fertigungsverfahren Fügen - Teil 1: Zusammensetzen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth 2003.

DIN EN ISO 9241-11 1999
DIN EN ISO 9241-11:1999-01: Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten - Teil 11: Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit; Leitsätze. Berlin: Beuth 1999.

DIN EN ISO 9241-110 2008
DIN EN ISO 9241-110:2008-09: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung. Berlin: Beuth 2008.

DIX et al. 2000
Dix, A.; Rodden, T.; Davies, N.; Trevor, J.; Friday, A.; Palfreyman, K.: Exploiting Space and Location as a Design Framework for Interactive Mobile Systems. ACM Transactions on Computer-Human Interaction (TOCHI) 7 (2000) 3, S. 285-321.

DOMSCHKE 2007
Domschke, W.: Logistik, Bd. 1: Transport. 5. Aufl. München: Oldenbourg 2007. ISBN: 978-3-48658-290-1.

DOPPING-HEPENSTAL 1981
Dopping-Hepenstal, L. L.: Head-up displays. The integrity of flight information. IEE Proceedings Part F Communications, Radar and Signal Processing 128 (1981) 7, S. 440-442.

DREYER 2006
Dreyer, J.: Situative Informationsbereitstellung an Fertigungseinrichtungen Informationsmodell und Erstellungssystematik. Diss. Universität Stuttgart (2005). Heimsheim: Jost-Jetter 2006. ISBN: 3-93694-783-X. (ISW Forschung und Praxis 160).

DU et al. 2005
Du, J.; Jiao, Y. Y.; Jiao, J.: Integrated BOM and routing generator for variety synchronization in assembly-to-order production. International Journal of Manufacturing Technology Management 16 (2005) 2, S. 233-243.

DUDENREDAKTION 2011
Dudenredaktion (Hrsg.): Duden - Deutsches Universalwörterbuch. 7. Aufl. Mannheim: Dudenverlag 2011. ISBN: 978-3-41105-507-4.

EASTMAN 1981
Eastman, C. M.: The Design of Assemblies. Society of Automotive Engineers (SAE) Technical Paper Series 810197 (1981).

ELMARAGHY & URBANIC 2004
ElMaraghy, W. H.; Urbanic, R. J.: Assessment of Manufacturing Operational Complexity. Annals of the CIRP 53 (2004) 1, S. 401-406.

ESCH 1985
Esch, H.: Arbeitsplanerstellung für die Montage. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (1985).

EVERSHEIM & SCHUH 2000
Eversheim, W.; Schuh, G. (Hrsg.): Produktion und Management. Betriebshütte. 7. Aufl. Berlin: Springer 2000. ISBN: 978-3-54059-360-7.

EVERSHEIM 2002
Eversheim, W.: Arbeitsvorbereitung. 4. Aufl. Berlin: Springer 2002. ISBN: 3-54042-016-9. (Organisation in der Produktionstechnik 3).

FELDMANN 1997
Feldmann, C.: Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung. Diss. Technische Universität München (1997). Berlin: Springer 1997. ISBN: 978-3-54062-059-4. (*iwb* Forschungsberichte 104).

FELDMANN et al. 2002
Feldmann, K.; Slama, S.; Lang, S.: Mitarbeiterkompetenz und Selbstorganisation in der Montage mit multimedialen Informationssystemen steigern. wt Werkstattstechnik online 92 (2002) 9, S. 404-410.

FELDMANN et al. 2004
Feldmann, K.; Gergs, H.-J.; Slama, S.; Wirth, U. (Hrsg.): Montage strategisch ausrichten - Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen. Berlin: Springer 2004. ISBN: 978-3-54040-304-3.

FINKENZELLER 2012
Finkenzeller, K.: RFID-Handbuch: Grundlagen und praktische Anwendungen von Transpondern, kontaktlosen Chipkarten und NFC. 6. Aufl. München: Hanser 2012. ISBN: 3-44642-992-1.

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. ISBN: 3-44621-730-4.

GERST et al. 2006
Gerst, D.; Heins, M.; Müller-Seegers, M.; Pachow, J.; Battmer, D.: Synergetische Montageplanung. wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 9, S. 575-581.

GINSBERG 1993
Ginsberg, M.: Essentials of Artificial Intelligence. San Francisco: Morgan Kaufmann 1993. ISBN: 978-1-55860-221-2.

GÖRZ 2003
Görz, G. (Hrsg.): Handbuch der künstlichen Intelligenz. 4. Aufl. München: Oldenbourg 2003. ISBN: 978-3-48627-212-3.

GRUNWALD 2002
Grunwald, S.: Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung. Diss. Technische Universität München (2001). München: Utz 2002. ISBN: 978-3-83160-095-3. (Forschungsberichte *iwb* 159).

GU & XU 2007
Gu, T.; Xu, Z.: The symbolic algorithms for maximum flow in networks. Computers & Operations Research 34 (2007) 3, S. 799-816.

HART et al. 1968
Hart, P. E.; Nilsson, N. J.; Raphael, B.: A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics 4 (1968) 2, S. 100-107.

HELMS 1991
Helms, W.: MTM – Ein Verfahren vorbestimmter Zeiten. Personal, MTM-Report 91/92 (1991), S. 33-39.

HENRIOUD & BOURJAULT 1988
Henrioud, J. M.; Bourjault, A.: LEGA: A computer-aided generator of assembly plans. In: Homem de Mello, L. S. et al. (Hrsg.): Computer-aided mechanical assembly planning. Orwell / USA: Kluwer 1988, S. 191-215. ISBN: 978-0-79239-205-7.

HICK 1952
Hick, W. E.: On the rate of gain of information. Quarterly Journal of Experimental Psychology o. Jhg. (1952) 4, S. 11-26.

HINCKLEY 1994
Hinckley, M.: A global conformance quality model. A new strategic tool for minimizing defects caused by variation, error, and complexity. Diss. Stanford University, Palo Alto / USA (1994). <http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/10120374-KSWiE9/native/10120374.pdf> - 14. August 2011.

HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1990
Homem de Mello, L. S.; Sanderson, A. C.: AND/OR graph representation of assembly plans. IEEE Transactions on Robotics and Automation 6 (1990) 2, S. 188-199.

HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991a
Homem de Mello, L. S.; Sanderson, A. C.: Representations of mechanical assembly sequences. IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (1991) 2, S. 211-227.

HOMEM DE MELLO & SANDERSON 1991b
Homem de Mello, L. S.; Sanderson, A. C.: A correct and complete algorithm for the generation of mechanical assembly sequences. IEEE Transactions on Robotics and Automation 7 (1991) 2, S. 228-240.

HUANG & LEE 1991
Huang, Y. F.; Lee, C. S. G.: A framework of knowledge-based assembly planning. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): Proceedings of the 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Sacramento / USA, 9.-11. April 1991. Los Alamitos / USA: IEEE Computer Society Press 1991, S. 599-604. ISBN: 0-81862-163-X.

HUBER et al. 2010
Huber, M.; Knoll, A.; Brandt, T.; Glasauer, S.: When to assist? - Modelling human behaviour for hybrid assembly systems. In: ITG (VDE) Information Technology Society of VDE et al. (Hrsg.): Proceedings for the joint conference of ISR 2010 (ROBOTIK 2010). München, 7.-9. Juni 2010. Berlin: VDE-Verlag 2010, S. 165-170. ISBN: 978-3-8007-3273-9.

HÜLZER-VOGT 1995
Hülzer-Vogt, H.: Metapher. In: Lenke, N. et al. (Hrsg.): Grundlagen sprachlicher Kommunikation. München: Fink 1995, S. 176-197. ISBN: 3-77053-042-X.

HUNTER et al. 1990
Hunter, J. E.; Schmidt, F. L.; Judiesch, M. K.: Individual differences in output variability as a function of job complexity. Journal of Applied Psychology 75 (1990) 1, S. 28-42.

HUTH 2004
Huth, C.: Groupware-basiertes Ad-hoc-Workflow-Management: Das GroupProcess-System. Diss. Universität Paderborn (2004). <http://dups.ub.uni-paderborn.de/hs/content/titleinfo/3284> - 8. August 2011.

HÜTHER & KOPPEL 2009
Hüther, M.; Koppel, O.: Die wirtschaftliche Bedeutung der Ingeniuerwissenschaften - Hat auch der Normalbürger etwas davon? In: Nagl, M. et al. (Hrsg.): Zukunft Ingenieurwissenschaften - Zukunft Deutschland. Berlin: Springer 2009, S. 21-40. ISBN: 978-3-54089-609-8.

HYMAN 1953
Hyman, R.: Stimulus information as a determinant of reaction time. Journal of Experimental Psychology 45 (1953) 3, S. 188-196.

ISHII et al. 1988
Ishii, K.; Adler, R.; Barkan, P.: Application of Design Compatibility Analysis to Simultaneous Engineering. Artificial Intelligence for Engineering, Design, Analysis and Manufacturing 2 (1988) 1, S. 53-65.

ISO/IEC 19501 2005
ISO/IEC 19501:2005-04: Informationstechnik - Offene verteilte Verarbeitung - Vereinheitlichte Modellierungssprache (UML) Version 1.4.2. Berlin: Beuth 2005.

JEZERNIK & HREN 2003
Jezernik, A.; Hren, G.: A solution to integrate computer-aided design (CAD) and virtual reality (VR) databases in design and manufacturing processes. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 22 (2003) 11-12, S. 768-774.

JONAS 2000
Jonas, C.: Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen. Diss. Technische Universität München (2000). München: Utz 2000. ISBN: 978-3-89675-870-5. (Forschungsberichte *iwb* 145).

JONES et al. 1998
Jones, R. E.; Wilson, R. H.; Calton, T. L.: On constraints in assembly planning. IEEE Transactions on Robotics and Automation 14 (1998) 6, S. 849-863.

KIM 1999
Kim, Y.-S.: A System Complexity Approach for the Integration of Product Development and Production System Design. Diss. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge / USA (1999). <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/9418> - 11. August 2010.

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

KLUßMANN 2009
Klußmann, J. H.: Einsatzpotenziale des Mobile Computing in der Produktionslogistik von Auftragsfertigern. Diss. Universität Hannover (2009). Garbsen: PZH, Produktionstechn. Zentrum 2009. ISBN: 978-3-94141-615-4. (Berichte aus dem IPH 2009/02).

KONOLD & REGER 2003
Konold, P.; Reger, H.: Praxis der Montagetechnik: Produktdesign, Planung, Systemgestaltung. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg 2003. ISBN: 978-3-52813-843-1.

KRINGS & LUCZAK 1997
Krings, K.; Luczak, H.: Gruppen- und Teamarbeit als Instrument zu Unternehmensentwicklung. In: Kröll, M. et al. (Hrsg.): Lernen der Organisation durch Gruppen- und Teamarbeit. Berlin: Springer 1997. ISBN: 3-54062-015-X.

KRÜGER et al. 1998
Krüger, T.; Schimmelpfeng, K.; Schöfer, A.: Beschäftigungsorientierte Rationalisierung. Industrie Management 14 (1998) 4, S. 13-16.

KRULL 2006
Krull, W.: Praxisorientierte Grundlagenforschung – ein Beitrag zur Zukunftsfähigkeit der Industrie in Deutschland. In: Schumann, M. et al. (Hrsg.): VW Auto 5000: ein neues Produktionskonzept: die deutsche Antwort auf den Toyota-Weg? Hamburg: VSA 2006. ISBN: 978-3-89965-220-8.

LAKOFF & JOHNSON 2004
Lakoff, G.; Johnson, M.: Leben in Metaphern: Konstruktion und Gebrauch von Sprachbildern. 4. Aufl. Heidelberg: Carl-Auer-Systeme-Verlag 2004. ISBN: 3-89670-487-7.

LAMBERT 2006
Lambert, A. J. D.: Generation of assembly graphs by systematic analysis of assembly structures. European Journal of Operational Research 168 (2006) 3, S. 932-951.

LANG 2007
Lang, S.: Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion. Diss. Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen (2007). Bamberg: Meisenbach 2007. ISBN: 978-3-87525-257-6. (Fertigungstechnik - Erlangen 181).

LAPERRIERE & ELMARAGHY 1992
Laperriere, L.; ElMaraghy, H. A.: Planning of Products Assembly and Disassembly. Annals of the CIRP 41 (1992) 1, S. 5-10.

LEBKOWSKI 1997
Lebkowski, P.: A two-level procedure for generating assembly sequences using a generic algorithm. International Conference on Industrial Engineering Production and Management (IEPM'97). Lyon / Frankreich, 20.-24. Oktober 1997.

LEE & GOSSARD 1985
Lee, K.; Gossard, D. C.: A hierarchical data structure for representing assemblies: Part 1. Computer-Aided Design 17 (1985) 1.

LEE & SHIN 1990
Lee, S.; Shin, Y. G.: Assembly planning based on subassembly extraction. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Cincinnati / USA, 13.-18. Mai 1990. Los Alamitos / USA: IEEE Computer Society Press 1990, S. 1606-1611. ISBN: 0-81869-061-5.

LEE 1992
Lee, S.: Backward assembly planning with assembly cost analysis. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Nizza / Frankreich, 12.-14. Mai 1992. Los Alamitos / USA: IEEE Computer Society Press 1992, S. 2382-2391. ISBN: 0-81862-720-4.

LEIBINGER 2003
Leibinger, B.: Der Maschinenbau in Deutschland – mit Mut Zukunft gestalten. In: Gesellschaft für Fertigungstechnik (Hrsg.): FTK 2003, Fertigungstechnisches Kolloquium: schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium am 13. bis 15. Oktober 2003 in Stuttgart. Stuttgart, 13.-15. Oktober 2003. Stuttgart: Gesellschaft für Fertigungstechnik 2003, S. 2-4. ISBN: 3-00012-337-7.

LIEBERMAN & WESLEY 1977
Lieberman, L. I.; Wesley, M. A.: AUTOPASS: An Automatic Programming System for Computer Controlled Mechanical Assembly. IBM Journal of Research and Development 21 (1977) 4, S. 321-333.

LIVINGSTON 2005
Livingston, M. A.: Evaluating Human Factors in Augmented Reality Systems. IEEE Computer Graphics and Applications 25 (2005) 6, S. 6-9.

LOTTER 1986
Lotter, B.: Wirtschaftliche Montage. Düsseldorf: VDI-Verlag 1986. ISBN: 3-18400-709-X.

LUHMANN 2000
Luhmann, N.: Vertrauen: Ein Mechanismus der Reduktion sozialer Komplexität. 4. Aufl. Stuttgart: Lucius und Lucius 2000. ISBN: 3-82820-148-2.

MARTINEZ et al. 1995
Martinez, M.; Champagne, J. P.; Ghoud, S.; Favrel, J.: Dynamic assembly sequences-a multi-agent control system. In: IEEE Computer Society (Hrsg.): INRIA/IEEE Symposium on Emerging Technology and Factory Automation (ETFA'95). Paris / Frankreich, 10.-13. Oktober 1995. Los Alamitos / USA: IEEE Computer Society Press 1995, S. 250-258. ISBN: 0-78032-535-4.

MASCLE 1999
Mascle, C.: Feature-based assembly model and multi-agents system structure for computer-aided assembly. In: Nevins, J. L. et al. (Hrsg.): Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on Assembly and Task Planning (ISATP '99). Porto / Portugal, 21.-24. Juli 1999. Piscataway / USA: IEEE Press 1999, S. 8-13. ISBN: 0-78035-704-3.

MATYSCZOK & MEYER 2009
Matysczok, C.; Meyer, D.: Erfolgsfaktoren bei der strategischen Einführung der Digitalen Fabrik. ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 104 (2009) 1-2, S. 27-31.

MAYNARD et al. 1948
Maynard, H. B.; Stegemerten, G. J.; Schwab, J. L.: Methods-time measurement. New York / USA: McGraw-Hill 1948. ISBN: 978-0070411050.

MIKSCH 1993
Miksch, R.: Methoden und Modelle zur rechnergestützten Optimierung automatisierter Montageprozesse. Diss. Technische Universität München (1993).

MIYAKAWA & OHASHI 1986
Miyakawa, S.; Ohashi, T.: The Hitachi Assembly Evaluation Method (AEM). International Conference on Product Design for Assembly. Newport / USA, 15.-17. April 1986.

MOHS et al. 2006
Mohs, C.; Hurtienne, J.; Israel, J. H.; Naumann, A.; C., K. l. M.; Meyer, H. A.; Pohlmeyer, A.: IUUI – Intuitive Use of User Interfaces. In: Bosenick, T. et al. (Hrsg.): Mensch & Computer 2006 - Usability Professionals. Gelsenkirchen, 3.-6. September 2006. Stuttgart: German Chapter der Usability Professionals' Association 2006, S. 130-133.

MOHS et al. 2007
Mohs, C.; Naumann, A.; Kindsmüller, M. C.: Mensch-Technik-Interaktion: intuitiv, erwartungskonform oder vertraut? MMI-interaktiv 13 (2007), S. 25-35.

MOTUS 2009
Motus, D.: Referenzmodell für die Montageplanung in der Automobilindustrie. Diss. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg (2008). München: Utz 2009. ISBN: 978-3-83160-860-7. (Informatik 87).

MUCKENHIRN 2005
Muckenhirn, R.: Konfigurierbares Leitsystem für modulare Montagezellen am Beispiel von Festplatten. Diss. Universität Stuttgart (2005). Stuttgart: Jost-Jetter 2005. ISBN: 3-93694-763-5. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 420).

MÜLLER 2008
Müller, S.: Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen. Diss. Technische Universität München (2007). München: Utz 2008. ISBN: 978-3-83160-750-1. (Forschungsberichte *iwb* 209).

MÜNZBERGER 2005
Münzberger, E.: Modularer Lehrbrief "Einführung in die Arbeitsmedizin", Abschnitt Einführung in die Arbeitsphysiologie. <http://arbmed.med.uni-rostock.de/lehrbrief/arbphys.htm> - 14. August 2011.

NACE 2008
NACE Rev. 2: Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft. Luxemburg: eurostat 2008.

NASTANSKY & HILPERT 1994
Nastansky, L.; Hilpert, W.: The GroupFlow System: A Scalable Approach to Workflow Management between Cooperation and Automation. In: Wolfinger, B. (Hrsg.): Innovationen bei Rechen- und Kommunikationssystemen (im Rahmen des 13th World Computer Congress). Hamburg, 28. August - 2. September 1994. Berlin: Springer 1994, S. 473-479. ISBN: 3-54058-313-0.

NONAKA & TAKEUCHI 1997
Nonaka, I.; Takeuchi, H.: Die Organisation des Wissens. wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen. Frankfurt: Campus 1997. ISBN: 3-59335-643-0.

OHASHI et al. 2002
Ohashi, T.; Iwata, M.; Arimoto, S.; Miyakawa, S.: Extended Assemblability Evaluation Method (AEM). 45 (2002) 2, S. 567-574.

OTTMANN & WIDMAYER 2002
Ottmann, T.; Widmayer, P.: Algorithmen und Datenstrukturen. 4. Aufl. Heidelberg: Spektrum 2002. ISBN: 3-82741-029-0.

PATRON 2005
Patron, C.: Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung. Diss. Technische Universität München (2004). München: Utz 2005. ISBN: 3-83160-474-6. (Forschungsberichte *iwb* 190).

PETRI 1962
Petri, C. A.: Kommunikation mit Automaten. Diss. Technische Hochschule Darmstadt (1962). (Schriften des Rheinisch-Westfälischen Instituts für instrumentelle Mathematik an der Universität Bonn 2).

PICKER 2007
Picker, C.: Prospektive Zeitbestimmung für nicht wertschöpfende Montagetätigkeiten. Diss. Universität Dortmund (2006). Aachen: Shaker 2007. ISBN: 978-3-83226-534-2. (Berichte aus dem Maschinenbau 222).

PRENTING & BATTAGLIN 1964
Prenting, T. O.; Battaglin, R. M.: The precedence diagram: A tool for analysis in assembly line balancing. Journal of Industrial Engineering 15 (1964) 4, S. 208-213.

PUCA & LANGENS 2007
Puca, R. M.; Langens, T. A.: Motivation. In: Müsseler, J. (Hrsg.): Allgemeine Psychologie. 2. Aufl. Heidelberg: Spektrum 2007, S. 191-231. ISBN: 978-3-82741-780-0.

RAI et al. 2011
Rai, D.; Kosidou, K.; Lundberg, M.; Araya, R.; Lewis, G.; Magnusson, C.: Psychological distress and risk of long-term disability: population-based longitudinal study. In: Bobak, M. et al. (Hrsg.): Journal of Epidemiology and Community Health Press Releases. <http://press.psprings.co.uk/jech/march/jech119644.pdf> - 14. August 2011.

RAPTIS et al. 2005
Raptis, D.; Tselios, N.; Avouris, N.: Context-based design of mobile applications for museums: a survey of existing practices. In: Tscheligi, M. (Hrsg.): Proceedings of the 7th international conference on Human computer interaction with mobile devices & services (MobileHCI '05). Salzburg / Österreich, 19.-22. September 2005. New York / USA: ACM Press 2005, S. 153-160. ISBN: 1-59593-089-2.

REASON 1994
Reason, J. T.: Menschliches Versagen. Heidelberg: Spektrum 1994. ISBN: 3-86025-098-1.

REED et al. 1990
Reed, K.; Harrvd, D.; Conroy, W.: Initial Graphics Exchanges Specification (IGES) version 5.0. 1990. <http://www.wiz-worx.com/iges5x/version5x/version5x.pdf> - 14. August 2011. (Veröffentlichung des CAD-CAM Data Exchange Technical Centre, Leeds / Großbritannien).

REFA 1990
REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Planung und Betrieb komplexer Produktionssysteme. 2. Aufl. München: Hanser 1990. ISBN: 978-3-44615-967-9.

REFA 1993a
REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Methodenlehre der Betriebsorganisation. Grundlagen der Arbeitsgestaltung. 2. Aufl. München: Hanser 1993. ISBN: 3-44617-386-2.

REFA 1993b
REFA, Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V. (Hrsg.): Ausgewählte Methoden der Planung und Steuerung. 1. Aufl. München: Hanser 1993. ISBN: 3-44617-704-3. (REFA Fachbuchreihe Betriebsorganisation).

RICHARDSON et al. 2004
Richardson, M.; Jones, G.; Torrance, M.: Identifying the task variables that influence perceived object assembly complexity. Ergonomics 47 (2004) 9, S. 945-964.

RICHARDSON et al. 2006
Richardson, M.; Jones, G.; Torrance, M.; Baguley, T.: Identifying the Task Variables That Predict Object Assembly Difficulty. Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society 48 (2006) 3, S. 511-525.

RICHTLINIE 2006/42/EG 2006
2006/42/EG: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung), Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 157/24 vom 09.06.2006. Brüssel, Belgien: 2006.

ROMBERG & HAAS 2005
Romberg, A.; Haas, M.: Der Anlaufmanager: Effizient arbeiten mit Führungssystem und Workflow. Stuttgart: LOG_X 2005. ISBN: 3-93229-826-8.

ROSELL 2004
Rosell, J.: Assembly and task planning using Petri nets: a survey. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 218 (2004) 8, S. 978-994.

ROTH 2005
Roth, J.: Mobile Computing: Grundlagen, Technik, Konzepte. 2. Aufl. Heidelberg: dpunkt 2005. ISBN: 3-89864-366-2.

RUDOLF 2007
Rudolf, H.: Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie. Diss. Technische Universität München (2006). München: Utz 2007. ISBN: 978-3-8316-0697-9. (Forschungsberichte *iwb* 204).

SALVENDY 2004
Salvendy, G.: Classification of human motions. Theoretical Issues in Ergonomics Science 5 (2004) 2, S. 169-178.

SANDERS 2006
Sanders, F.: Verknüpfung von Arbeit und Lernen. In: Schumann, M. et al. (Hrsg.): VW Auto 5000: ein neues Produktionskonzept: die deutsche Antwort auf den Toyota-Weg? Hamburg: VSA 2006, S. 79-89. ISBN: 978-3-89965-220-8.

SAWIK 1997
Sawik, T.: Flexible Assembly Line Balancing with Alternate Assembly Plans and Duplicate Task Assignments. In: IEEE (Hrsg.): 6th International Conference on Emerging Technology and Factory Automation (ETFA'97). Los Angeles / USA, 9.-12. September 1997. Piscataway / USA: IEEE Press 1997, S. 171-176. ISBN: 0-78034-192-9.

SCHENCK & WILSON 1994
Schenck, D. A.; Wilson, P. R.: Information Modeling: The EXPRESS Way. Piscataway / USA: Oxford University Press 1994. ISBN: 978-0-19508-714-7.

SCHIRRMEISTER et al. 2003
Schirrmeister, E.; Warnke, P.; Dreher, C.: Untersuchung über die Zukunft der Produktion in Deutschland: Sekundäranalyse von Vorausschau-Studien für den europäischen Vergleich. 2003. <http://www.zukunft-der-produktion.de/beispielanalysen/Abschlussbericht.pdf> - 14. August 2011. (Deutscher Anteil des Eureka-Factory-Projekts Informan 2000+, Abschlussbericht).

SCHMID 2001
Schmid, W.: Berechnung kürzester Wege in Straßennetzen mit Wegeverboten. Diss. Universität Stuttgart (2000). München: Beck 2001. ISBN: 3-76969-577-1. (Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften: Reihe C 538).

SHALIN et al. 1996
Shalin, V. L.; Prabhu, G. V.; Helander, M. G.: A cognitive perspective on manual assembly. Ergonomics 39 (1996) 1, S. 108-127.

SHANNON 1948
Shannon, C. E.: A Mathematical Theory of Communication. The Bell System Technical Journal 27 (1948), S. 379-423, 623-656.

SHIBATA et al. 2003
Shibata, H.; Cheldelin, B.; Ishii, K.: Assembly Quality Method: Integrating Design for Assembly Cost-Effectiveness (DAC) to Improve Defect Prediction. In: American Society of Mechanical Engineers (ASME) (Hrsg.): Proceedings of the 2003 ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. Chicago / USA, 2.-6. September 2003. New York / USA: American Society of Mechanical Engineers 2003. ISBN: 0-79183-701-7.

SLAMA 2004
Slama, S.: Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz. Diss. Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen (2004). Bamberg: Meisenbach 2004. ISBN: 978-3-87525-204-0. (Fertigungstechnik - Erlangen 148).

SPATH & WEULE 1993
Spath, D.; Weule, H.: Intelligent Support Mechanisms in Adaptable Human-Computer Interfaces. Annals of the CIRP 42 (1993) 1, S. 519-522.

SPATH & GERLACH 2003
Spath, D.; Gerlach, S.: Informationen für Teams in Montage und Produktion. wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 9, S. 624-626.

SPATH et al. 2005a
Spath, D.; Gerlach, S.; Scholtz, O.: Visuelle Entscheidungsunterstützung für Teamarbeit auf Shop-Floor-Ebene. In: Kaluza, B. et al. (Hrsg.): Erfolgsfaktor Flexibilität. Berlin: Schmidt 2005, S. 367-382. ISBN: 3-50308-367-7.

SPATH et al. 2005b
Spath, D.; Becker, M.; Koch, S.: Die adaptive unternehmerische Arbeitsorganisation. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 1/2, S. 3-6.

SPUR 2003
Spur, G.: Automation als technologische Herausforderung. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003, S. 205-214. ISBN: 3-54000-594-3.

STADZISZ & HENRIOUD 1995
Stadzisz, P. C.; Henrioud, J. M.: Integrated design of product families and assembly systems. In: IEEE Robotics and Automation Society (Hrsg.): IEEE International Conference on Robotics and Automation. Nagoya / Japan, 21.-27. Mai 1995. Piscataway / USA: IEEE Press 1995, S. 1290–1295. ISBN: 0-78031-965-6.

STARKE 1990
Starke, P. H.: Analyse von Petri-Netz-Modellen. Stuttgart: Teubner 1990. ISBN: 3-51902-244-3. (Leitfäden und Monographien der Informatik).

STARKE 1995
Starke, P. H.: A Memo on Time Constraints in Petri Nets. Berlin: Publikationsstelle der Humbolt Universität 1995. (Informatik-Bericht 46).

STEINWASSER 1997
Steinwasser, P.: Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozessplanung. Diss. Friedrich-Alexander-Universität, Erlangen (1996). Bamberg: Meisenbach 1997. ISBN: 3-87525-084-2. (Fertigungstechnik Erlangen 63).

SVENSSON 2001
Svensson, C.: A discussion of future challenges to ‘built to order’ SMEs. Mass customization: A threat or a challenge? In: Hvolby, H.-H. (Hrsg.): Proceedings of The Fourth SMESME International Conference. Aalborg / Dänemark, 14.-16. Mai 2001. 2. Aufl. Aalborg / Dänemark: Aalborg University 2001, S. 35-43. ISBN: 87-8986-781-5.

SWAMINATHAN & BARBER 1996
Swaminathan, A.; Barber, K. S.: An experience-based assembly sequence planner for mechanical assemblies. IEEE Transactions on Robotics and Automation 12 (1996) 2, S. 252-267.

TANG et al. 2003
Tang, A.; Owen, C.; Biocca, F.; Mou, W.: Comparative Effectiveness of Augmented Reality in Object Assembly. In: Cockton, G. et al. (Hrsg.): Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '03). Fort Lauderdale / USA, 5.-10. April 2003. New York / USA: ACM Press 2003, S. 73-80. ISBN: 1-58113-630-7.

TEMA-Q 2011
TEMA-Q, Technik und Management für Qualität GmbH: Navigationssysteme - Teil I: Nutzungsverhalten und Trends. Meinersen: 2011. <http://www.tema-q.de> - 13.05.2012.

THALER 1993
Thaler, K.: Regelbasiertes Verfahren zur Montageablaufplanung in der Serienfertigung. Diss. Universität Stuttgart Berlin: Springer 1993. ISBN: 3-54056-829-8. (IPA-IAO-Forschung und Praxis 176).

THOMAS et al. 1996
Thomas, J. P.; Nissanke, N.; Baker, K. D.: Boundary models for assembly knowledge representation. IEEE Transactions on Robotics and Automation 12 (1996) 2, S. 302-312.

TURAU 2009
Turau, V.: Algorithmische Graphentheorie. 3. Aufl. München: Oldenbourg 2009. ISBN: 978-3-48659-057-9.

VDI 2221 1993
VDI 2221:1993-05: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. Düsseldorf: VDI-Verlag 1993.

VDI 2222-1 1997
VDI 2222:1997-06, Blatt 1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997.

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

W3C 2006
W3C, World Wide Web Consortium: Extensible Markup Language (XML). <http://www.w3.org/XML/> - 14. August 2011.

WEIMER et al. 2008
Weimer, T.; Kapp, R.; Klemm, P.; E., W.: Integrated Data Management in Factory Planning and Factory Operation: An Information Model and its Implementation. In: Mitsuishi, M. et al. (Hrsg.): Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier: The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems. Tokyo / Japan, 26.-28. Mai 2008. London / Großbritannien: Springer 2008, S. 229-234. ISBN: 978-1-84800-267-8.

WESTKÄMPER et al. 1998
Westkämper, E.; Sautter, K.; Meyer, R.: Mehr Erfolg durch professionellen Methodeneinsatz - Ergebnisse einer empirischen Untersuchung zum Methodeneinsatz in produzierenden Unternehmen. Darmstadt: REFA 1998.

WESTKÄMPER et al. 2006
Westkämper, E.; Decker, M.; Jendoubi, L.: Einführung in die Organisation der Produktion. Berlin: Springer 2006. ISBN: 978-3-54026-039-4.

WICKENS 2002
Wickens, C. D.: Multiple resources and performance prediction. Theoretical issues in ergonomics science 3 (2002) 2, S. 159-177.

WIENER 1965
Wiener, N.: Cybernetics. 2. Aufl. Cambridge / USA: MIT Press 1965. ISBN: 978-0-262-73009-9.

WIESBECK et al. 2006
Wiesbeck, M.; Zaeh, M. F.; Rudolf, H.; Vogl, W.: New Media and Technology Support in Manual Assembly. In: Fischer, X. et al. (Hrsg.): Research in Interactive Design: Proceedings of Virtual Concept 2006. Playa Del Carmen / Mexiko, 26. November - 1. Dezember 2006. Paris / Frankreich: Springer 2006, 2InCo (CD-ROM). ISBN: 978-2-28748-363-9.

WILLNECKER 2001
Willnecker, U.: Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen. Diss. Technische Universität München (2000). München: Utz 2001. ISBN: 3-89675-891-8. (Forschungsberichte *iwb* 146).

WORTMANN et al. 1997
Wortmann, J. C.; Muntslag, D. R.; Timmermans, P. J. M. (Hrsg.): Customer-driven manufacturing. London: Chapman & Hall 1997. ISBN: 0-41257-030-0.

YEH & WICKENS 2000
Yeh, M.; Wickens, C. D.: Attention and Trust Biases in the Design of Augmented Reality Displays. Chicago / USA: 2000. <http://www.dtic.mil/cgi-bin/GetTRDoc?AD=ADA440368&doc=GetTRDoc.pdf> - 14. August 2011. (Technical report of the Aviation Research Lab of the University of Illinois).

ZAEH & RUDOLF 2005
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 / Brasilien, 16.-18. Mai 2005.

ZAEH & WIESBECK 2008
Zaeh, M. F.; Wiesbeck, M.: A Model for Adaptively Generating Assembly Instructions Using State-based Graphs. In: Mitsuishi, M. et al. (Hrsg.): Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier: The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems. Tokyo / Japan, 26.-28. Mai 2008. London / Großbritannien: Springer 2008, S. 195-198. ISBN: 978-1-84800-267-8.

ZAEH et al. 2009
Zaeh, M. F.; Ostgathe, M.; Lau, C.; Wiesbeck, M.: Adaptive, Product-based Control of Production Processes. In: Zaeh, M. F. (Hrsg.): 3rd International Conference on Changeable, Agile, Reconfigurable and Virtual Production (CARV 2009). München, 5.-7. Oktober 2009. München: Utz 2009, S. 99-110. ISBN: 978-3-8316-0933-8.

ZÄH et al. 2005a
Zäh, M. F.; Vogl, W.; Patron, C.: Interaktive Planung von Produktionssystemen mittels Augmented Reality. wt Werkstattstechnik online 95 (2005) 9, S. 615-619.

ZÄH et al. 2005b
Zäh, M. F.; Rimpau, C.; Wiesbeck, M.: Produktion im globalen Umfeld. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb ZWF 100 (2005) 5, S. 246-250.

ZÄH et al. 2007
Zäh, M. F.; Wiesbeck, M.; Wallhoff, F.; Stork, S.; Engstler, F.; Bannat, A.; Schubö, A.; Friesdorf, F.: Kognitive Assistenzsysteme in der manuellen Montage. wt Werkstattstechnik online 97 (2007) 9, S. 644-650.

ZÄH & WIESBECK 2008
Zäh, M. F.; Wiesbeck, M.: Ein Modell zur zustandsbasierten Erzeugung von Montageanweisungen. In: Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. (Hrsg.): Produkt- und Produktions-Ergonomie: Aufgabe für Entwickler und Planer. München, 9.-11. April 2008. Dortmund: GfA-Press 2008, S. 219-222. ISBN: 978-3-93680-406-5.

ZÄPFEL 2001
Zäpfel, G.: Grundzüge des Produktions- und Logistikmanagement. 2. Aufl. München: Oldenbourg 2001. ISBN: 3-486-25618-1. (Internationale Standardlehrbücher der Wirtschafts- und Sozialwissenschaften)

ZHONG et al. 2006
Zhong, Y.; Huang, M.; Gu, T.: Storage and manipulations of directed graph based on OBDD. In: Fang, J. et al. (Hrsg.): Proceedings of SPIE 6358: Sixth International Symposium on Instrumentation and Control Technology: Sensors, Automatic Measurement, Control, and Computer Simulation. Peking / VRC, 13.-15. Oktober 2006. Bellingham / USA: SPIE 2006, S. 531-535. ISBN: 978-0-81946-453-8.

ZHOU & JENG 1998
Zhou, M.; Jeng, M. D.: Modeling, Simulation, and Control of Flexible Manufacturing Systems: A Petri Net Approach. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing 11 (1998) 3, S. 333-357.

9 Anhang

9.1 Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen der Entstehung der vorliegenden Dissertationsschrift wurden unter wissenschaftlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) Studienarbeiten betreut. Inhalte und Erkenntnisse von Arbeiten, welche Fragestellungen der Montage im Allgemeinen und der situationsorientierten Werkerführung im Besonderen zum Gegenstand hatten, sind teilweise in das vorliegende Dokument eingegangen. Der Autor dankt den Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Im Folgenden sind die Studienarbeiten in alphabetischer Reihenfolge des Nachnamens des Autors aufgeführt.

GIRTH, T.
: Softwareergonomische Prinzipien in der Gestaltung adaptiver Montageassistenzsysteme, eingereicht im Februar 2010. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 4.7 eingegangen.

KÜBLER, F.
: Aufbau eines Systems zur Erfassung der Greifposition an einem Kleinteileregal, eingereicht im Februar 2010. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 5.2.3 und Abschnitt 5.3.4 eingegangen.

PENG, H.
: Analysis and structuring of intelligent storage systems in manual assembly scenarios, eingereicht im Februar 2009. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 5.2.3 eingegangen.

PLITT, M.
: Entwicklung und Anwendung von Routenplanungsalgorithmen in der Montageplanung, eingereicht im März 2010. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 3.3.2, Abschnitt 5.3.4 und Abschnitt 6.2.6 eingegangen.

ROSSKOPF, M.

Randbedingungen für den Einsatz von RFID in der Produktion, eingereicht im Dezember 2005. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 4.6 eingegangen.

WAGNER, C.

Konzeption eines Prozessmodells zur adaptiven Generierung von Montageanweisungen, eingereicht im Mai 2008. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 4.2.3 eingegangen.

VOLGGER, L.

Methodology for the derivation of assembly primitives to transform given subassembly states, eingereicht im November 2008. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 3.2.2, Abschnitt 3.2.3 und Abschnitt 5.2.3 eingegangen.

YING, C.

Definition einer XML-Struktur für schematische Montageanweisungen, eingereicht im August 2008. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 5.2.3.3, Abschnitt 5.3.2 und Abschnitt 6.2.4 eingegangen.

YING, C.

Methodik zur Ableitung von Montagegraphen aus bestehenden Daten der Planungssysteme, eingereicht im August 2009. Teile der Studienarbeit sind in Abschnitt 5.3.2 eingegangen.

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). In der Norm werden Bezeichner für die meisten Begriffe, die für die Modellierung wichtig sind, definiert und mögliche Beziehungen zwischen diesen Begriffen beschrieben. Zudem werden die grafischen Notationen für Begriffe und Modelle von statischen Strukturen und von dynamischen Abläufen festgelegt.

Klassenelemente mit ihren Beziehungen zu anderen Klassenelementen in Form von Blöcken und verschiedenen Verbindungslinien werden beschrieben. Abbildung 59 zeigt beispielhaft Klassen in der UML-Notation. Der Auftrag 2607 und der Auftrag 2008 sind jeweils Unterklassen von Auftrag Nr. und erben von diesem Assoziationen, Attribute und Methoden. Ferner können zwischen den Klassen verschiedene Methodenaufrufe bestehen. Einem Element kann eine Multiplizität mit einer unteren und einer oberen Schranke zugeordnet sein. Ein Stern bedeutet hierbei, dass es keine obere Beschränkung gibt. Die Assoziationen können in die Aggregation und die Komposition unterschieden werden. In diesem Beispiel ist ein Produkt physikalischer Bestandteil eines Auftrags. Ein Arbeitsplan wiederum ist einem Produkt zugeordnet, kann jedoch auch Teil einer anderen Klasse sein.

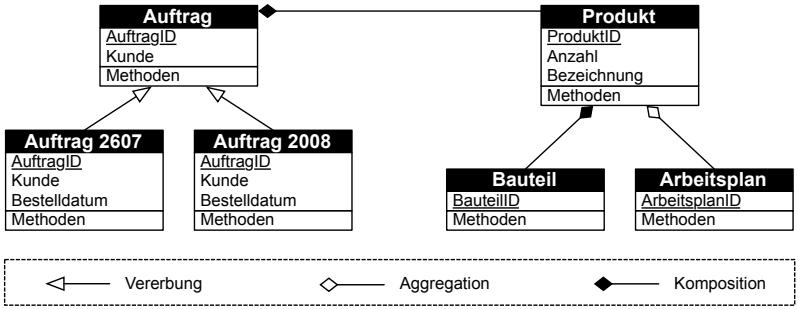


Abbildung 59: Beispielhafte Abbildung von Klassen in der Unified Modeling Language

9.3 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 (W3C 2006). XML definiert die Regeln für den Aufbau von Dokumenten. In Abbildung 60 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 3 und 8 für Auftrag, gekennzeichnet werden. Attribute stellen als Schlüsselwort-Werte-Paare (Attribut-Name = "Attribut-Wert") Zusatzinformationen über Elemente bereit. So wird z. B. in Zeile 4 das Merkmal AuftragID definiert und mit einem Wert belegt. Weiterhin ist es möglich, Listenelemente zu erstellen. Dies wird in Abbildung 60 mit dem Element <item> in den Zeilen 15 bis 17 realisiert.

```
1   <?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
2   - <AssemblyConfig>
3       - <Auftrag AuftragID="2607">
4           <Kunde>Huber GmbH</Kunde>
5           - <Children>
6               <item>Minaturroboter2012</item>
7           </Children>
8       </Auftrag>
9       - <Produkte>
10          - <Produkt ProduktID="4711">
11              <Bezeichnung>Minaturroboter</ Bezeichnung>
12              + <Arbeitsplan ArbeitsplanID="Minaturroboter2012_c3">
13              - <Bauteile>
14                  <item>Grundplatte2011_c2_002</item>
15                  <item>Greifarm2012_c3_001</item>
16                  <item>Antrieb2011_c2_002</item>
17              </Bauteile>
18          </Produkt>
19          + <Produkt ProduktID="0815">
20      </Produkte>
21      + <Prozesse>
22      + <Ressourcen>
23  </AssemblyConfig>
```

Abbildung 60: Beispiel einer XML-Datei

9.4 Radio Frequenz Identifikation (RFID)

Radio Frequenz Identifikation (RFID, engl. *radio frequency identification*) bezeichnet eine Identifikationstechnologie, bei der Daten zwischen einem Datenträger, auch Transponder oder Tag genannt, und einem Schreib-Lese-Gerät kontaktlos übertragen werden können. Diese erfolgt üblicherweise über magnetische oder elektromagnetische Felder, die überbrückbare Distanz liegt je nach technischer Ausführung im Zentimeter- oder Meterbereich. Trotz der großen Bandbreite unterschiedlicher RFID-Lösungen ist jedes RFID-System durch die Eigenschaften elektronische Identifikation, kontaktlose Datenübertragung und Senden von Daten auf Abruf charakterisiert. Ein RFID-System besteht nach FINKENZELLER (2012) aus den folgenden drei Komponenten, welche in Abbildung 61 dargestellt sind:

- Einem mobilen Datenspeicher, *Transponder* oder auch *Tag* genannt. Der Transponder wird an das zu identifizierende Objekt angebracht bzw. in ein Objekt integriert und kann ausgelesen und je nach Ausführung auch beschrieben werden.
- Einem Schreib-Lese-Gerät mit Antenne, das die in seinem Ansprechbereich befindlichen Transponder gezielt ansprechen kann, ihre Daten auslesen kann und die Transponder je nach Ausführung neu beschreiben kann. Das Schreib-Lese-Gerät kann auch nur ein Lesegerät sein, wenn der Datenspeicher des Transponders nicht beschrieben wird.
- Einem Computersystem, welches die Aktivitäten des RFID-Systems über eine Applikationssoftware steuert.

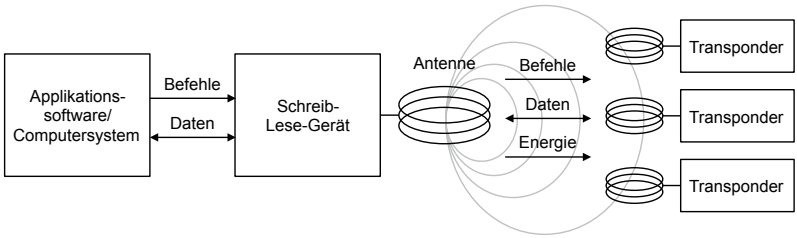


Abbildung 61: Aufbau und Funktionsweise eines RFID-Systems nach FINKENZELLER (2012)

9.5 Klassendiagramm des Demonstrators

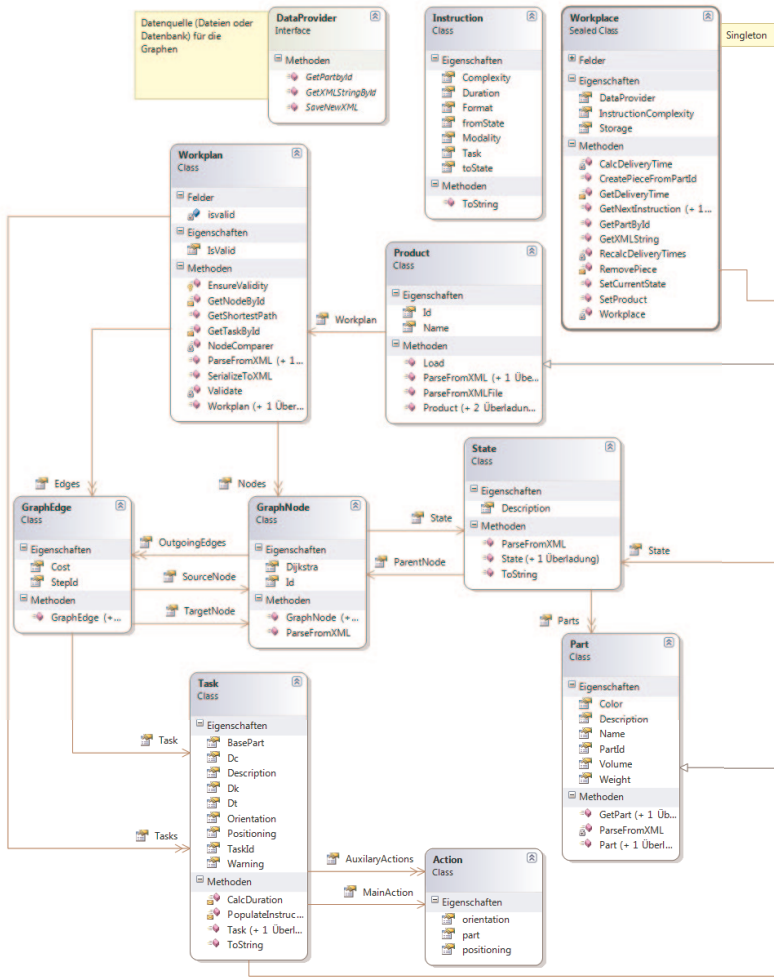


Abbildung 62a: Klassendiagramm in Microsoft Visual Studio Notation (Darstellung auf Doppelseite)

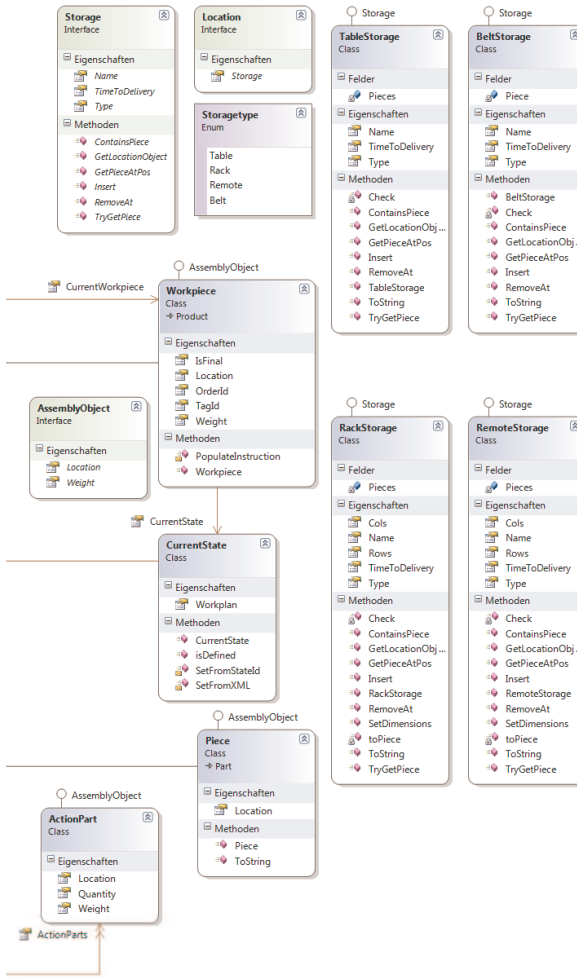


Abbildung 62b: Klassendiagramm in Microsoft Visual Studio Notation (Darstellung auf Doppelseite)

9.6 Genutzte Softwareprodukte

MICROSOFT VISUAL STUDIO 2010 PROFESSIONAL

Objekt-orientierte Entwicklungsumgebung

Microsoft, Corp.
One Microsoft Way
Redmond, WA 98052
USA
<http://www.microsoft.de>

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

<OXYGEN/> XML EDITOR VERSION 11

Editor

SyncRO soft SRL
Str. Remus, Nr. 5A
Craiova 200082
Rumänien
<http://www. oxygenxml.com>

Seminarberichte iwb

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

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utzverlag.de, www.utzverlag.de

1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
6 Materialbearbeitung mit Laser · von der Planung zur Anwendung
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
8 Qualitätsmanagement · der Weg ist das Ziel
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Analysen und Konzepte
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe · Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen – Plug & Play – Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
27 Rapid Prototyping · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
28 Rapid Tooling · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Abschlußseminar
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
31 Engineering Data Management (EDM) · Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
33 3D-CAD · Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
34 Laser in der Produktion · Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
35 Ablaufsimulation · Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
36 Moderne Methoden zur Montageplanung · Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit · Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
38 Rapid Prototyping · Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
39 Rapid Tooling · Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie · Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
43 Produktivität und Verfügbarkeit · ...durch Kooperation steigern
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
44 Automatisierte Mikromontage · Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
45 Produzieren in Netzwerken · Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
46 Virtuelle Produktion · Ablaufsimulation
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt-& Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein-und Prototypenserien
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten · ISBN 3-98675-069-0
70 Mechatronik · Strukturdynamik 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 Ergfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
74 Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
76 Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapsel zur aseptischen Ampulle
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
77 ERP-Systeme - Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
78 Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
79 Produktionsmanagement
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
80 Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
81 Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
82 Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
83 Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
84 Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
85 3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
86 Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
87 Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
88 Mechatronik · Vorsprung durch Simulation
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
89 RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1
90 Rapid Manufacturing und Digitale Fabrik · Durch Innovation schnell und flexibel am Markt
100 Seiten · ISBN 978-3-89675-090-7
91 Robotik in der Kleinserienproduktion – Die Zukunft der Automatisierungstechnik
ISBN 978-3-89675-091-4
92 Rapid Manufacturing · Ressourceneffizienz durch generative Fertigung im Werkzeug- und Formenbau
ISBN 978-3-89675-092-1
93 Handhabungstechnik · Innovative Greiftechnik für komplexe Handhabungsaufgaben
136 Seiten · ISBN 978-3-89675-093-8
94 iwb Seminarreihe 2009 Themengruppe Werkzeugmaschinen
245 Seiten · ISBN 978-3-89675-094-5
95 Zuführtechnik · Herausforderung der automatisierten Montage!
111 Seiten · ISBN 978-3-89675-095-2
96 Risikobewertung bei Entscheidungen im Produktionsumfeld · Seminar »Risiko und Chance«
151 Seiten · ISBN 978-3-89675-096-9
97 Seminar Rapid Manufacturing 2010 · Innovative Einsatzmöglichkeiten durch neue Werkstoffe bei Schichtbauverfahren
180 Seiten · ISBN 978-3-89675-097-6

98 Handhabungstechnik · Der Schlüssel für eine automatisierte Herstellung von Composite-Bauteilen
260 Seiten · ISBN 978-3-89675-098-3
99 Abschlussveranstaltung SimuSint 2010 · Modulares Simulationssystem für das Strahlschmelzen
270 Seiten · ISBN 978-3-89675-099-0
100 Additive Fertigung: Innovative Lösungen zur Steigerung der Bauteilqualität bei additiven Fertigungsverfahren
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-4114-7
101 Mechatronische Simulation in der industriellen Anwendung
91 Seiten · ISBN 978-3-8316-4149-9
102 Wissensmanagement in produzierenden Unternehmen
ISBN 978-3-8316-4169-7
103 Additive Fertigung: Bauteil- und Prozessauslegung für die wirtschaftliche Fertigung
ISBN 978-3-8316-4188-8
104 Ressourceneffizienz in der Lebensmittelkette
ISBN 978-3-8316-4192-5
105 Werkzeugmaschinen: Leichter schwer zerspanen! · Herausforderungen und Lösungen für die Zerspanung von Hochleistungswerkstoffen
120 Seiten · ISBN 978-3-8316-4217-5
106 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
108 Seiten · ISBN 978-3-8316-4221-2
107 Batterieproduktion – Vom Rohstoff bis zum Hochvoltspeicher
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-4249-6

Forschungsberichte iwb

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

Band 1–121, herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, sind im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg erschienen

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

122 *Burghard Schneider:* Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-559-9
123 *Bernd Goldstein:* Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-546-9
124 *Helmut E. Mößmer:* Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
164 Seiten · ISBN 978-3-89675-585-8
125 *Ralf-Gunter Gräser:* Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
167 Seiten · ISBN 978-3-89675-603-9
126 *Hans-Jürgen Trossin:* Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-614-5
127 *Doris Kugelmann:* Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
168 Seiten · ISBN 978-3-89675-615-2
128 *Rolf Diesch:* Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-618-3
129 *Werner E. Lulay:* Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
190 Seiten · ISBN 978-3-89675-620-6
130 *Otto Murr:* Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
178 Seiten · ISBN 978-3-89675-636-7
131 *Michael Macht:* Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
170 Seiten · ISBN 978-3-89675-638-1
132 *Bruno H. Mehler:* Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden
152 Seiten · ISBN 978-3-89675-645-9
133 *Knut Heitmann:* Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
146 Seiten · ISBN 978-3-89675-675-6
134 *Stefan Blessing:* Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
160 Seiten · ISBN 978-3-89675-690-9
135 *Can Abay:* Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
159 Seiten · ISBN 978-3-89675-697-8
136 *Stefan Brandner:* Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
172 Seiten · ISBN 978-3-89675-715-9
137 *Arnd G. Hirschberg:* Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
165 Seiten · ISBN 978-3-89675-729-6
138 *Alexandra Reek:* Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
193 Seiten · ISBN 978-3-89675-730-2
139 *Khalid-Alexander Sabbah:* Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
148 Seiten · ISBN 978-3-89675-739-5
140 *Klaus U. Schliffenbacher:* Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
187 Seiten · ISBN 978-3-89675-754-8
141 *Andreas Sprenzel:* Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
144 Seiten · ISBN 978-3-89675-757-9

142 *Andreas Gallasch:* Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
150 Seiten · ISBN 978-3-89675-781-4

143 *Ralf Cuiper:* Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
174 Seiten · ISBN 978-3-89675-783-8

144 *Christian Schneider:* Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
180 Seiten · ISBN 978-3-89675-789-0

145 *Christian Jonas:* Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
183 Seiten · ISBN 978-3-89675-870-5

146 *Ulrich Willnecker:* Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
194 Seiten · ISBN 978-3-89675-891-0

147 *Christof Lehner: Beschreibung des Nd:*YAG-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
205 Seiten · ISBN 978-3-8316-0004-5

148 *Frank Rick:* Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
145 Seiten · ISBN 978-3-8316-0008-3

149 *Michael Höhn:* Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
185 Seiten · ISBN 978-3-8316-0012-0

150 *Jörn Böhl:* Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-0020-5

151 *Robert Bürgel:* Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
185 Seiten · ISBN 978-3-8316-0021-2

152 *Stephan Dürrschmidt:* Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-0023-6

153 *Bernhard Eich:* Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
136 Seiten · ISBN 978-3-8316-0028-1

154 *Wolfgang Rudorfer:* Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
207 Seiten · ISBN 978-3-8316-0037-3

155 *Hans Meier:* Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
166 Seiten · ISBN 978-3-8316-0044-1

156 *Gerhard Nowak:* Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-0055-7

157 *Martin Werner:* Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
191 Seiten · ISBN 978-3-8316-0058-8

158 *Bernhard Lenz:* Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
162 Seiten · ISBN 978-3-8316-0094-6

159 *Stefan Grunwald:* Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-0095-3

160 *Josef Gartner:* Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
165 Seiten · ISBN 978-3-8316-0096-0

161 *Wolfgang Zeller:* Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0100-4

162 *Michael Loferer:* Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
178 Seiten · ISBN 978-3-8316-0118-9

163 *Jörg Führer:* Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
176 Seiten · ISBN 978-3-8316-0124-0

164 *Jürgen Höppner:* Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
144 Seiten · ISBN 978-3-8316-0125-7

165 *Hubert Götte:* Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
258 Seiten · ISBN 978-3-8316-0126-4

166 *Martin Weißenberger:* Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-0138-7

167 *Dirk Jacob:* Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0142-4

168 *Ulrich Roßgoderer:* System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
175 Seiten · ISBN 978-3-8316-0154-7

169 *Robert Klingel:* Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
164 Seiten · ISBN 978-3-8316-0174-5

170 *Paul Jens Peter Ross:* Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
144 Seiten · ISBN 978-3-8316-0191-2

171 *Stefan von Praun:* Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
252 Seiten · ISBN 978-3-8316-0202-5

172 *Florian von der Hagen:* Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-0208-7

173 *Oliver Kramer:* Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
212 Seiten · ISBN 978-3-8316-0211-7

174 *Winfried Dohmen:* Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0214-8

175 *Oliver Anton:* Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme
158 Seiten · ISBN 978-3-8316-0215-5

176 *Welf Broser:* Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-0217-9

177 *Frank Breitinger:* Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
156 Seiten · ISBN 978-3-8316-0227-8

178 *Johann von Pieverling:* Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
163 Seiten · ISBN 978-3-8316-0230-8

179 *Thomas Baudisch:* Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-0249-0

180 *Heinrich Schieferstein:* Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
132 Seiten · ISBN 978-3-8316-0251-3

181 *Joachim Berlak:* Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-0258-2

182 *Christian Meierlohr:* Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
181 Seiten · ISBN 978-3-8316-0292-6

183 *Volker Weber:* Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
230 Seiten · ISBN 978-3-8316-0330-5

184 *Thomas Bongardt:* Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
170 Seiten · ISBN 978-3-8316-0332-9

185 *Tim Angerer:* Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0336-7

186 *Alexander Krüger:* Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
197 Seiten · ISBN 978-3-8316-0371-8

187 *Matthias Meindl:* Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
236 Seiten · ISBN 978-3-8316-0465-4

188 *Thomas Fusch:* Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-0467-8

189 *Thomas Mosandl:* Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
182 Seiten · ISBN 978-3-8316-0471-5

190 *Christian Patron:* Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-0474-6

191 *Robert Cisek:* Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0475-3

192 *Florian Auer:* Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
160 Seiten · ISBN 978-3-8316-0485-2

193 *Carsten Selke:* Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
137 Seiten · ISBN 978-3-8316-0495-1

194 *Markus Seefried:* Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-0503-3

195 *Wolfgang Wagner:* Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-0586-6

196 *Christopher Ulrich:* Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0590-3

197 *Johann Härtl:* Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
148 Seiten · ISBN 978-3-8316-0611-5

198 *Bernd Hartmann:* Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-0615-3

199 *Michael Schilp:* Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0631-3

200 *Florian Manfred Grätz:* Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0643-6

201 *Dieter Eireiner:* Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-0650-4

202 *Gerhard Volkwein:* Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-0668-9

203 *Sven Roeren:* Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-0680-1

204 *Henning Rudolf:* Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0697-9

205 *Stella Clarke-Griebsch:* Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-0701-3

206 *Michael Ehrenstraßer:* Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0743-3

207 *Rainer Schack:* Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-0748-8

208 *Wolfgang Sudhoff:* Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
300 Seiten · ISBN 978-3-8316-0749-5

209 *Stefan Müller:* Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-0750-1

210 *Ulrich Kohler:* Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
246 Seiten · ISBN 978-3-8316-0753-2

211 *Klaus Schlickenrieder:* Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-0776-1

212 *Niklas Möller:* Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-0778-5

213 *Daniel Siedl:* Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfahrbewegungen
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-0779-2

214 *Dirk Ansorge:* Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-0785-3

215 *Georg Wünsch:* Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
238 Seiten · ISBN 978-3-8316-0795-2

216 *Thomas Oertli:* Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-0798-3

217 *Bernd Petzold:* Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsente Mikromontage
234 Seiten · ISBN 978-3-8316-0805-8

218 *Loucas Papadakis:* Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
260 Seiten · ISBN 978-3-8316-0813-3

219 *Mathias Mörtl:* Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-0820-1

220 *Sebastian Weig:* Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
252 Seiten · ISBN 978-3-8316-0823-2

221 *Tobias Hornfeck:* Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
150 Seiten · ISBN 978-3-8316-0826-3

222 *Hans Egermeier:* Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
230 Seiten · ISBN 978-3-8316-0833-1

223 *Matthäus Sigl:* Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
200 Seiten · ISBN 978-3-8316-0841-6

224 *Mark Harfensteller:* Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
198 Seiten · ISBN 978-3-8316-0849-2

225 *Jochen Werner:* Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
210 Seiten · ISBN 978-3-8316-0857-7

226 *Florian Hagemann:* Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-0861-4

227 *Haitham Rashidy:* Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-0862-1

228 *Wolfgang Vogl:* Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
248 Seiten · ISBN 978-3-8316-0869-0

229 *Sonja Schedl:* Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
176 Seiten · ISBN 978-3-8316-0874-4

230 *Andreas Trautmann:* Bifocal Hybrid Laser Welding · A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
314 Seiten · ISBN 978-3-8316-0876-8

231 *Patrick Neise:* Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-0878-2

232 *Christian Habicht:* Einsatz und Auslegung zeitfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-0891-1

233 *Michael Spitzweg:* Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0931-4

234 *Ulrich Munzert:* Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
176 Seiten · ISBN 978-3-8316-0948-2

235 *Georg Völlner:* Rührreibschweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-0955-0

236 *Nils Müller:* Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
286 Seiten · ISBN 978-3-8316-0992-5

237 *Franz Decker:* Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
180 Seiten · ISBN 978-3-8316-0996-3

238 *Christian Lau:* Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
204 Seiten · ISBN 978-3-8316-4012-6

239 *Christoph Rimpau:* Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
268 Seiten · ISBN 978-3-8316-4015-7

240 *Michael Loy:* Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung
190 Seiten · ISBN 978-3-8316-4027-0

241 *Andreas Eursch:* Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
226 Seiten · ISBN 978-3-8316-4029-4

242 *Florian Schwarz:* Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
282 Seiten · ISBN 978-3-8316-4030-0

243 *Martin Georg Prasch:* Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
261 Seiten · ISBN 978-3-8316-4033-1

244 *Johannes Schilp:* Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4063-8

245 *Stefan Lutzmann:* Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
242 Seiten · ISBN 978-3-8316-4070-6

246 *Gregor Branner:* Modellierung transienter Effekte in der Strukturtsimulation von Schichtbauverfahren
230 Seiten · ISBN 978-3-8316-4071-3

247 *Josef Ludwig Zimmermann:* Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
186 Seiten · ISBN 978-3-8316-4091-1

248 *Clemens Pörnbacher:* Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
280 Seiten · ISBN 978-3-8316-4108-6

249 *Alexander Lindworsky:* Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
294 Seiten · ISBN 978-3-8316-4125-3

250 *Michael Mauderer:* Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4126-0

251 *Roland Mork:* Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
228 Seiten · ISBN 978-3-8316-4127-7

252 *Florian Reichl:* Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-4128-4

253 *Paul Gebhard:* Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4129-1

254 *Michael Heinz:* Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
302 Seiten · ISBN 978-3-8316-4147-5

255 *Pascal Krebs:* Bewertung vernetzter Produktionsstandorte unter Berücksichtigung multidimensionaler Unsicherheiten
244 Seiten · ISBN 978-3-8316-4156-7

256 *Gerhard Straßer:* Greiftechnologie für die automatisierte Handhabung von technischen Textilien in der Faserverbundfertigung
290 Seiten · ISBN 978-3-8316-4161-1

257 *Frédéric-Felix Lacour:* Modellbildung für die physikbasierte Virtuelle Inbetriebnahme materialflussintensiver Produktionsanlagen
222 Seiten · ISBN 978-3-8316-4162-8

258 *Thomas Hensel:* Modellbasierter Entwicklungsprozess für Automatisierungslösungen
184 Seiten · ISBN 978-3-8316-4167-3

259 *Sherif Zaidan:* A Work-Piece Based Approach for Programming Cooperating Industrial Robots
212 Seiten · ISBN 978-3-8316-4175-8

260 *Hendrik Schellmann:* Bewertung kundenspezifischer Mengenflexibilität im Wertschöpfungsnetz
224 Seiten · ISBN 978-3-8316-4189-5

261 *Marwan Radi:* Workspace scaling and haptic feedback for industrial telepresence and teleaction systems with heavy-duty teleoperators
172 Seiten · ISBN 978-3-8316-4195-6

262 *Markus Ruhstorfer:* Rührreibschweißen von Rohren
206 Seiten · ISBN 978-3-8316-4197-0

263 *Rüdiger Daub:* Erhöhung der Nahttiefe beim Laserstrahl-Wärmeleitungsschweißen von Stählen
182 Seiten · ISBN 978-3-8316-4199-4

264 *Michael Ott:* Multimaterialverarbeitung bei der additiven strahl- und pulverbettbasierten Fertigung
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4201-4

265 *Martin Ostgathe:* System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage
278 Seiten · ISBN 978-3-8316-4206-9

266 *Imke Nora Kellner:* Materialsysteme für das pulverbettbasierte 3D-Drucken
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4223-6

267 *Florian Oefele:* Remote-Laserstrahlschweißen mit brillanten Laserstrahlquellen
238 Seiten · ISBN 978-3-8316-4224-3

268 *Claudia Anna Ehinger:* Automatisierte Montage von Faserverbund-Vorformlingen
252 Seiten · ISBN 978-3-8316-4233-5

269 *Tobias Zeilinger:* Laserbasierte Bauteillagebestimmung bei der Montage optischer Mikrokomponenten
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4234-2

270 *Stefan Krug:* Automatische Konfiguration von Robotersystemen (Plug&Produce)
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4243-4

271 *Marc Lotz:* Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit beim Schwungrad-Reibschweißen durch modellbasierte Regelungsverfahren
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4245-8

272 *William Brice Tekouo Moutchiho:* A New Programming Approach for Robot-based Flexible Inspection systems
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4247-2

273 *Matthias Waibel:* Aktive Zusatzsysteme zur Schwingungsreduktion an Werkzeugmaschinen
158 Seiten · ISBN 978-3-8316-4250-2

274 *Christian Eschey:* Maschinenspezifische Erhöhung der Prozessfähigkeit in der additiven Fertigung
216 Seiten · ISBN 978-3-8316-4270-0

275 *Florian Aull:* Modell zur Ableitung effizienter Implementierungsstrategien für Lean-Production-Methoden
270 Seiten · ISBN 978-3-8316-4283-0

276 *Marcus Hennauer:* Entwicklungsbegleitende Prognose der mechatronischen Eigenschaften von Werkzeugmaschinen
214 Seiten · ISBN 978-3-8316-4306-6

277 *Alexander Götzfried:* Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren
220 Seiten · ISBN 978-3-8316-4310-3

278 *Saskia Reinhardt:* Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4317-2

279 *Fabian J. Meling:* Methodik für die Rekombination von Anlagentechnik
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4319-6

280 *Jörg Egbers:* Identifikation und Adaption von Arbeitsplätzen für leistungsgewandelte Mitarbeiter entlang des Montageplanungsprozesses
192 Seiten · ISBN 978-3-8316-4328-8

281 *Max von Bredow:* Methode zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit und des Risikos unternehmensübergreifender Wertschöpfungskonfigurationen in der Automobilindustrie
208 Seiten · ISBN 978-3-8316-4337-0

282 *Tobias Philipp:* RFID-gestützte Produktionssteuerungsverfahren für die Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoffen
142 Seiten · ISBN 978-3-8316-4346-2

283 *Stefan Rainer Johann Braunreuther:* Untersuchungen zur Lasersicherheit für Materialbearbeitungsanwendungen mit brillanten Laserstrahlquellen
232 Seiten · ISBN 978-3-8316-4348-6

284 *Johannes Pohl:* Adaption von Produktionsstrukturen unter Berücksichtigung von Lebenszyklen
202 Seiten · ISBN 978-3-8316-4358-5

285 *Mathey Wiesbeck:* Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung
194 Seiten · ISBN 978-3-8316-4369-1