

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

**Planung und Bewertung
von Rekonfigurationsprozessen
in Produktionssystemen**

Robert Cisek

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. habil. H. Rühmann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. P. Nyhuis,
Universität Hannover

Die Dissertation wurde am 21.10.2004 bei der Technischen Universität München
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 19.01.2005 ange-
nommen.

Forschungsberichte

iwb

Band 191

Robert Cisek

***Planung und Bewertung
von Rekonfigurationsprozessen
in Produktionssystemen***

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Herbert Utz Verlag

UTZ

Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen
und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart
Technische Universität München
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte
bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2005

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

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2005

ISBN 3-8316-0475-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
Tel.: 089/277791-00 – www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

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

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

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

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

Vorwort

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

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

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Peter Nyhuis, dem Leiter des Instituts für Fabrikanlagen der Universität Hannover, möchte ich mich für die Übernahme des Koreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken. Ebenfalls möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. habil. Heinzpeter Rühmann, Extraordinarius am Lehrstuhl für Ergonomie der Technischen Universität München, für die Übernahme des Vorsitzes danken.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich. Dabei möchte ich meinen Diplomanden Christoph Rimpau hervorheben, dessen Arbeit einen maßgeblichen Beitrag leistete. Für die fachlichen Diskussionen sowie die inhaltlichen Anregungen gebührt meinen Kollegen Christian Habicht, Niklas Möller sowie Henning Rudolf ebenfalls mein aufrichtiger Dank. Darüber hinaus danke ich meinem Freund und Kollegen Patrick Neise für die vielfältigen Ablenkungen und bereichernden Erfahrungen in allen Lebenslagen.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern Eka und Günter Cisek sowie meiner übrigen Familie, deren uneingeschränkte Unterstützung mir stets den erforderlichen Rückhalt gegeben hat und geben wird. Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meiner Frau Maren, die mich mit ihrem Optimismus und ihrer unerschöpflichen Lebensfreude gerade in der Schlussphase meiner Arbeit entscheidend motivierte.

München, im Januar 2005

Robert Cisek

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
Notation	XV
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung der Arbeit	5
2.1 Spezifizierung des Untersuchungsbereiches	5
2.2 Forschungsziel.....	8
2.3 Vorgehensweise	10
3 Stand der Erkenntnisse	13
3.1 Informationsorientierte Ansätze.....	13
3.1.1 Controllingkonzepte in der Produktion	13
3.1.2 Kennzahlensysteme für die Produktion.....	15
3.2 Planungsorientierte Ansätze.....	18
3.2.1 Allgemeine Planungsansätze	18
3.2.2 Rechnerunterstützte Planungsansätze.....	21
3.2.2.1 Allgemeine Grundlagen	22
3.2.2.2 Das Verfahren von Lacksonen & Ensore.....	23
3.2.2.3 Das Verfahren von Bogatzki.....	24
3.2.2.4 Das Verfahren von Solimanpur, Vrat & Shankar	26

3.2.2.5	Das Verfahren von Chiang	27
3.2.2.6	Das Verfahren von Lacksonen	28
3.2.2.7	Das Verfahren von Kim & Kim	30
3.2.2.8	Das Verfahren von Dunker, Radons & Westkämper	31
3.2.2.9	Das Verfahren von Garces-Perez, Schoenefeld & Wainwright	33
3.2.2.10	Zusammenfassende Bewertung	34
3.3	Bewertungsorientierte Ansätze	37
3.3.1	Modelle der Kosten- und Leistungsrechnung	38
3.3.1.1	Vollkostenrechnung	38
3.3.1.2	Teilkostenorientierte Ansätze	39
3.3.1.3	Modelle mit differenzierter Fixkostenbetrachtung	40
3.3.1.4	Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung	43
3.3.1.5	Betriebsmodelle	44
3.3.1.6	Kapazitätskostenrechnung	45
3.3.1.7	Zusammenfassende Bewertung	46
3.3.2	Modelle der Investitionsrechnung	49
3.3.3	Lebenszyklusorientierte Modelle	50
4	Methodik zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen	53
4.1	Anforderungen an die Methodik	53
4.2	Aufbau der Methodik	55
5	Konzeption des Monitoringmoduls	59
5.1	Aufbau eines Kennzahlensystems zur Strukturüberwachung	59

5.1.1	Ableitung strukturrelevanter Kennzahlen	59
5.1.2	Leistungsorientierte Kennzahlen	62
5.1.3	Nutzungsorientierte Kennzahlen	63
5.1.4	Kostenorientierte Kennzahlen	65
5.1.4.1	Einsatz der Maschinenstundensatzrechnung	66
5.1.4.2	Ermittlung der Beschäftigungsabweichung	68
5.2	Bewertung externer Einflussgrößen	69
5.2.1	Singuläre Ereignisse als Auslöser für Rekonfigurationsprozesse	70
5.2.2	Entwicklung des Produktionsprogramms als Auslöser für Rekonfigurationsprozesse.....	70
5.3	Identifikation des Bedarfs nach Strukturadaption.....	71
6	Konzeption des Planungsmoduls	75
6.1	Optimierung der bestehenden Produktionsstruktur	75
6.1.1	Bestimmung von Arbeitsplanalternativen	75
6.1.1.1	Darstellung von Arbeitsplanalternativen	76
6.1.1.2	Auswahl von Arbeitsplänen	77
6.1.2	Erzeugung von Layoutvarianten	80
6.1.2.1	Festlegung des Hallenlayouts	80
6.1.2.2	Bildung von Betriebsmittelgruppen	83
6.1.2.3	Zuordnung der Betriebsmittelgruppen zum Hallenlayout	85
6.1.2.4	Optimierung der Betriebsmittelanordnung	90
6.1.3	Anbindung an die Simulation	94
6.2	Planung der Umsetzung von Rekonfigurationsprozessen.....	94

6.2.1	Definition von Arbeitspaketen und Beziehungen	95
6.2.2	Ablauf der Umsetzungsplanung	97
7	Konzeption des Bewertungsmoduls	101
7.1	Bewertung von Strukturalternativen	101
7.1.1	Ermittlung der Leistungskosten	101
7.1.2	Ermittlung der Bereitschaftskosten	103
7.1.2.1	Beschreibung der zeitlichen Veränderbarkeit von Kapazitäten	104
7.1.2.2	Bereitschaftskosten für kostenplatzbezogene Potenzialfaktoren	105
7.1.2.3	Bereitschaftskosten für Potenzialfaktoren ohne feste Zuordnung	107
7.2	Bewertung des Migrationsaufwands	108
7.2.1	Bestimmung der statischen Aufwände	109
7.2.2	Bestimmung der dynamischen Aufwände	110
7.3	Auswahl einer Strukturalternative	112
7.3.1	Ermittlung der Differenzdeckungsbeiträge	113
7.3.2	Ermittlung des Kapitalwerts und des Amortisationszeitpunkts	116
8	Anwendung der Methodik	121
8.1	Ablauf- und aufbauorganisatorische Einbindung der Planungsmethodik	121
8.2	Entwicklung eines prototypischen DV-Hilfsmittels zur Anwendungsunterstützung	123
8.3	Kritische Würdigung	128
9	Zusammenfassung und Ausblick	131

10	Literaturverzeichnis.....	135
11	Anhang	157
11.1	Mathematische Formulierung des Layoutproblems.....	157
11.1.1	Das quadratische Zuordnungsproblem.....	157
11.1.2	Graphentheoretisches Modell.....	158
11.1.3	Gemischt-ganzzahlige Programmierung	158
11.2	Lösungsverfahren zur Layoutplanung	159
11.2.1	Lösungsverfahren nach LACKSONEN & ENSCORE (1993).....	159
11.2.2	Lösungsverfahren nach SOLIMANPUR et al. (2004).....	160
11.2.3	Lösungsverfahren nach CHIANG (2001).....	163
11.2.4	Lösungsverfahren nach LACKSONEN (1997).....	165
11.2.5	Lösungsverfahren nach KIM & KIM (2000).....	170
11.2.6	Lösungsverfahren nach DUNKER et al. (2003).....	173
11.2.7	Lösungsverfahren nach GARCES-PEREZ et al. (1996).....	177
11.3	A*-Algorithmus	178

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Problem der temporären Optimalität einer Produktionsstruktur nach SESTERHENN (2003, S. 2).....	2
Abbildung 2: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs (in Anlehnung an DOHMS 2001, S. 10).....	5
Abbildung 3: Strukturebenen eines Produktionssystems (in Anlehnung an HENN & KÜHNLE 1996, S. 67)	7
Abbildung 4: Aufbau der Arbeit	10
Abbildung 5: Systematik der Kostenabweichung (in Anlehnung an REICHMANN 1997, S. 288).....	15
Abbildung 6: Übersicht der Lösungsverfahren zur Layoutplanung.....	23
Abbildung 7: Lösungsverfahren nach LACKSONEN & ENSCORE (1993).....	24
Abbildung 8: Lösungsverfahren nach BOGATZKI (1998)	25
Abbildung 9: Lösungsverfahren nach SOLIMANPUR et al. (2004).....	26
Abbildung 10: Lösungsverfahren nach CHIANG (2001)	28
Abbildung 11: Lösungsverfahren nach LACKSONEN (1997)	29
Abbildung 12: Lösungsverfahren nach KIM & KIM (2000).....	31
Abbildung 13: Lösungsverfahren nach DUNKER et al. (2003).....	32
Abbildung 14: Beispiele von slicing tree structures für das gleiche Layout	33
Abbildung 15: Lösungsverfahren nach GARCES-PEREZ et al. (1996).....	34
Abbildung 16: Differenzierte Fixkostenbetrachtung bei verschiedenen Kostenrechnungsverfahren (in Anlehnung an MAYER 1998, S. 24 f.).....	41
Abbildung 17: Zahlenbeispiel für die Fixkostenmanagementorientierte Plankostenrechnung	42
Abbildung 18: Konzept der Betriebsmodelle nach LABMANN (1983).....	44

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 19: Grundprinzip der Kostenermittlung bei der kapazitätsorientierten Kostenrechnung nach MAYER (1998, S. 53)	46
Abbildung 20: Übersicht dynamischer Verfahren der Investitionsrechnung (in Anlehnung an KRUSCHWITZ 1976, S. 245)	50
Abbildung 21: Aufbau der Methodik zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen.....	56
Abbildung 22: Elemente des Kennzahlensystems	61
Abbildung 23: Bestandteile der Durchlaufzeit in Anlehnung an REFA (1991) 63	
Abbildung 24: Zeitanteile eines Betriebsmittels.....	64
Abbildung 25: Beispiel einer Kostenfunktion	68
Abbildung 26: Ablauf bei der Identifikation von Restrukturierungsbedarfen... 73	
Abbildung 27: Darstellung von Arbeitsplanalternativen im Netzplan	76
Abbildung 28: Tabellarische Übersicht der Arbeitsplanalternativen	77
Abbildung 29: Beispiel eines Hallenlayouts.....	80
Abbildung 30: Positionierung eines Betriebsmittels im Layout.....	82
Abbildung 31: Erweiterte Materialflussmatrix	85
Abbildung 32: Entfernungsmessung bei der Gruppenzuordnung	87
Abbildung 33: Kreuzung von Individuen nach dem order crossover-Verfahren	89
Abbildung 34: Mutation eines Individuums	90
Abbildung 35: Exakte Entfernungsmessung zwischen Betriebsmitteln unterschiedlicher Gruppen.....	91
Abbildung 36: Dynamische Beziehungsmatrix	96
Abbildung 37: Algorithmus zur Umsetzungsplanung	98
Abbildung 38: Beispiel eines Projektplans.....	100
Abbildung 39: Ermittlung der Leistungskosten.....	102

Abbildung 40: Beschreibung von Kapazitätsveränderungen in Vertragsdatenbanken.....	106
Abbildung 41: Ermittlung von Kapazitätsveränderungen bei kostenplatzübergreifenden Potenzialfaktoren.....	108
Abbildung 42: Bestimmung der statischen Aufwände	109
Abbildung 43: Ableitung der Produktionsunterbrechung aus dem Projektplan	110
Abbildung 44: Bestimmung der dynamischen Aufwände durch Abschätzung der Mehraufwendungen bei den Herstellkosten (Personalkostenanteil).....	112
Abbildung 45: Ermittlung des Differenzdeckungsbeitrags.....	115
Abbildung 46: Zeitliche Einordnung von Rekonfigurationsprozessen auf der Ebene von Produktionsstrukturen.....	122
Abbildung 47: Ablauf von Rekonfigurationsprozessen.....	123
Abbildung 48: Geometrische Beschreibung von Betriebsmitteln und Fabrikhallen mit Hilfe des entwickelten prototypischen DV-Hilfsmittels.....	125
Abbildung 49: Optimierung der Betriebsmittelanordnung mit genetischen Algorithmen durch Anwendung des prototypischen DV-Hilfsmittels.....	126
Abbildung 50: Benutzeroberfläche des prototypischen DV-Hilfsmittels zur Visualisierung der Simulationsergebnisse	127
Abbildung 51: Ablauf der Layoutplanung im prototypischen DV-Hilfsmittel	127
Abbildung 52: Durch die konzeptionierten Module gewährleistete Anforderungserfüllung im Sinne der Aufgabenstellung.....	129
Abbildung 53: Mögliche Nachbarschaftsbeziehungen nach CHIANG (2001)..	164
Abbildung 54: Beispiel eines zusammenhängenden kantengewichteten Graphen	179

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammenfassende Bewertung der Layoutplanungsverfahren.	36
Tabelle 2:	Beispiel einer Kostenstellenrechnung auf Basis einer flexiblen Plankostenrechnung	67
Tabelle 3:	Beispiel für Maschinenstundensatzänderung bei veränderter Auslastung.....	69
Tabelle 4:	Beispielhafter Auszug einer Arbeitsplankombinationsliste.....	78
Tabelle 5:	Beispiel einer Arbeitplankombinationsauswahl anhand der Kriterien ‚Kapazitätsüberschreitung‘ und ‚zusammenhängende Restkapazität‘	79
Tabelle 6:	Punktesystem zur Bewertung der Attraktivität nachbarschaftlicher Betriebsmittelanordnung	84
Tabelle 7:	Definition der Variable u_v zur Reduzierung des genetischen Codes.....	93
Tabelle 8:	Beispiel für die erforderlichen Kapazitäten bei der Verlagerung von Betriebsmitteln	99
Tabelle 9:	Zeitliche Veränderbarkeit und Zahlungsmodalität von Potenzialfaktoren nach MAYER (1998, S. 84)	105
Tabelle 10:	Ermittlung des Kapitalwerts auf der Basis der Differenzdeckungsbeiträge	118

Abkürzungsverzeichnis

ACO	Ant Colony Optimisation
Anm.	Anmerkung
BDE	Betriebsdatenerfassung
BMS	Biological Manufacturing Systems
bspw.	beispielsweise
bzgl.	bezüglich
bzw.	beziehungsweise
CAD	Computer Aided Design
CIM	Computer Integrated Manufacturing
d.h.	das heißt
DFLP	Dynamic Facility Layout Problem
DIN	Deutsche Industrienorm
EA	einmalig anfallend
e.V.	eingetragener Verein
engl.	englisch
et al.	et alii
etc.	et cetera
f.	folgende
ff.	fortfolgende
FTF	fahrerloses Transportfahrzeug
FTS	fahrerloses Transportsystem
i.d.R.	in der Regel
JE	Jahresende

Abkürzungsverzeichnis

ME	Monatsende
PPS	Produktionsplanung und –steuerung
QE	Quartalsende
REFA	REFA – Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
S.	Seite
SB	sachverhaltsbezogen
SFLP	Static Facility Layout Problem
sog.	so genannte
u.a.	und andere
usw.	und so weiter
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
Verf.	Verfasser
vgl.	vergleiche
WJA	wiederkehrend anfallend am Jahresanfang
WJE	wiederkehrend anfallend am Jahresende
WMA	wiederkehrend anfallend am Monatsanfang
WME	wiederkehrend anfallend am Monatsende
WQA	wiederkehrend anfallend am Quartalsanfang
WQE	wiederkehrend anfallend am Quartalsende
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

Notation

j, k	Gruppenflächenindizes
p, q	Maschinengruppenindizes
v, w	Maschinenindizes
A_v^B, A_v^H	relative Position des Materialausgangs, gemessen von der linken unteren Ecke der Maschine v
A_v^x, A_v^y	absolute Position des Materialausgangs von Maschine v in der Gruppenfläche
d_{jk}	Transportweg zwischen Gruppenfläche j und Gruppenfläche k
$d_{jv^{fix}}$	Transportweg zwischen Gruppenfläche j und der fixierten Maschine v^{fix}
E_v^B, E_v^H	relative Position des Materialeingangs, gemessen von der linken unteren Ecke der Maschine v
E_v^x, E_v^y	absolute Position des Materialeingangs von Maschine v in der Gruppenfläche
f_{pq}	Transportbeziehung zwischen den Maschinengruppen p und q
f_{vw}	Transportbeziehung zwischen den Maschinen v und w
$f_{qv^{fix}}$	Transportbeziehung zwischen der neu angeordneten Maschinengruppe q und der im Vorfeld fixierten Maschinen v^{fix}
g	Anzahl Gruppenflächen
G_j^B, G_j^H	Breite bzw. Höhe der Gruppenfläche j
G_j^{x1}, G_j^{y1}	absolute Position der linken bzw. unteren Kante der Gruppenfläche j im Layout
G_j^{x2}, G_j^{y2}	absolute Position der rechten bzw. oberen Kante der Gruppenfläche j im Layout
$I_i^{(\gamma)}$	i -tes Individuum in der Generation γ
L_x, L_y	Maße der Layoutfläche
m	Anzahl Maschinen
m^{fix}	Anzahl fixierter Maschinen
M_v^B, M_v^H	Breite bzw. Höhe der Maschine v
M_v^{x1}, M_v^{y1}	absolute Position der linken bzw. unteren Kante der Maschine v in der Gruppenfläche
M_v^{x2}, M_v^{y2}	absolute Position der rechten bzw. oberen Kante der Maschine v in der Gruppenfläche

Notation

n	Anzahl Maschinengruppen
p_j	Zuordnung der Maschinengruppe i zur Gruppenfläche j
v^{fix}	Index der fixierten Maschinen

Anmerkung:

Aufgrund der unterschiedlichen Notationen bestehender Arbeiten zur rechnergestützten Fabrikplanung wird auf die Erläuterungen in den entsprechenden Abschnitten verwiesen.

1 Einleitung

Die Globalisierung von Märkten und Produktionsstandorten ist durch die Weiterentwicklungen bzw. Kostenreduktionen in den Bereichen Informations- und Kommunikationstechnologien sowie Logistik vehement vorangetrieben worden. Das Resultat ist eine zuvor unerreichte Transparenz und Vergleichbarkeit von Produkt- und Dienstleistungsangeboten, die zu einem deutlich verschärften Wettbewerb in fast allen Branchen führt. Indizien hierfür sind immer neue Produktvarianten bei gleichzeitig sinkenden Stückzahlen in bereits gesättigten Märkten. Dies ergibt einen hohen Innovationsdruck bei gleichzeitig abnehmender Prognostizierbarkeit der Absatzentwicklungen (MILBERG 2000, S. 313; SPATH et al. 2001, S. 235). Verkürzte Produktlebenszyklen bedingen immer kürzere Amortisationszeiten, die das unternehmerische Risiko aufgrund des hohen Fixkostenanteils weiter steigern (SCHUH et al. 1998, S. 13 ff.).

Gemessen am durchschnittlichen Kapitaleinsatz je Beschäftigten hat sich die Kapitalintensität der produzierenden Unternehmen in Deutschland von den 60er zu den 90er Jahren mehr als verdreifacht. Während die Arbeitsproduktivität stetig stieg, ging der zunehmende Kapitaleinsatz mit einer absinkenden Kapitalrentabilität einher (KNÖDLER 2000, S. 57 f; NIEDERLÄNDER 2000, S. 93 ff.). In Folge dessen gilt es, die Rentabilität des eingesetzten Kapitals auch unter dynamischen Marktanforderungen sicherzustellen. Dies kann nur über die Fähigkeit zur unverzüglichen Anpassung der Produktionsstruktur an unvorhersehbare Einflüsse erreicht werden (WIENDAHL 2002, S. 122 f.).

Flexibilität als Möglichkeit zur Veränderung in vorgehaltenen Korridoren ist eine der oft geforderten Fähigkeiten von Produktionssystemen. Daher ist es wichtig, diese bereits bei der Planung von Produktionssystemen zu berücksichtigen. So ermöglicht Flexibilität die Beherrschung von Szenarien, die bei der Planung des Produktionssystems bereits einbezogen werden können. Es handelt sich hierbei um vorgehaltene, problemspezifische Lösungen, die eine definierte obere und untere Grenze implizieren (bspw. Arbeitszeitkonten und hieraus resultierende, exakt quantifizierbare Mehr- bzw. Minderausbringung eines Bereichs). Demnach bedingt Flexibilität die a priori Festlegung einer maximalen Schwankungsbreite innerhalb einer Planungsperiode (REINHART et al. 1999, S. 21 f; SPATH et al. 2002, S. 28). Vor dem Hintergrund abnehmender Prognostizierbarkeit und der Tatsache, dass Produktlebenszyklus und Lebensdauer eines Produktionssystems

1 Einleitung

immer weiter auseinander laufen (KLIMKE 2002), ist eine solche Festlegung oft nicht mehr möglich und Flexibilität allein demzufolge unzureichend.

Produktionssysteme müssen daher die Fähigkeit zur Adaption jenseits eines geplanten Korridors besitzen (WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2000, S. 37; WESTKÄMPER 2003, S. 97 f.). Sie sind so zu gestalten, dass Anpassungspotenziale im Bedarfsfall aktiviert werden können, ohne kostenintensive Lösungen vorzuzulassen. Diese Fähigkeit wird als Wandlungsfähigkeit bezeichnet und ist zunächst ungerichtet bzw. lösungsneutral (REINHART et al. 2002; CISEK et al. 2002).

Ein Ansatz zur Erfüllung der Forderung nach mehr Wandlungsfähigkeit im Bereich der Produktion ist eine breitere Nutzungsmöglichkeit der Fabrikgebäude, um die freie Positionierbarkeit von Anlagen zu gewährleisten. Dies betrifft insbesondere die Medienversorgung, Stützenfreiheit sowie zulässige Boden- und Tragwerksbelastungen. Die Mobilität der zur Verfügung stehenden Ressourcen ist eine notwendige Voraussetzung, um Strukturmaßnahmen, d.h. Veränderungen von Art, Anzahl und Anordnung der Betriebsmittel, schnell und effizient umsetzen zu können. Während konventionelle Bearbeitungszentren oder Montagearbeitsplätze in der Regel bereits ohne größeren Aufwand verlagert werden können, herrscht in diesem Punkt im Bereich der Sondermaschinen noch Nachholbedarf (SCHILLING-PRAETZEL et al. 2002, S. 341).

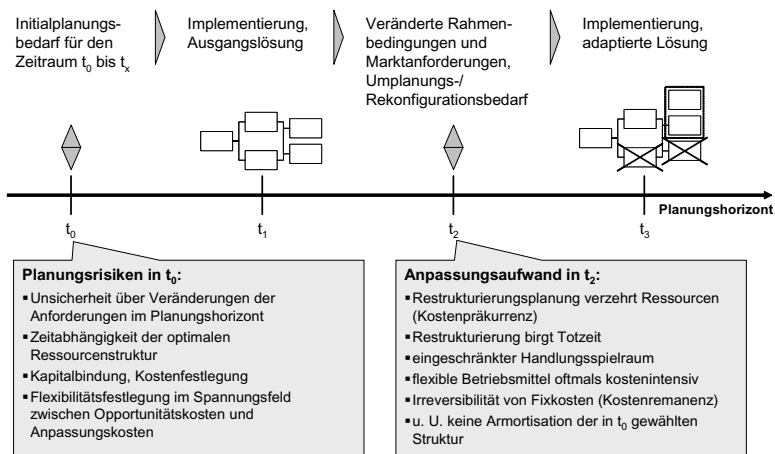


Abbildung 1: Problem der temporären Optimalität einer Produktionsstruktur nach SESTERHENN (2003, S. 2)

Ständig veränderte Rahmenbedingungen, wie z.B. die Einführung neuer Produkte oder Prozesse, Veränderungen im Abrufverhalten oder das Erreichen bestimmter Phasen im Produktlebenszyklus, führen dazu, dass eine optimale Produktionsstruktur nur temporären Charakter haben kann (SESTERHENN 2003, S. 2 f.). WIENDAHL & HARMS (2001a, S. 8) sprechen in diesem Zusammenhang von einem „Teufelskreis der Fabrikplanung“. So ist eine einmal geplante Fabrik vielen antizipierten und stochastischen Veränderungen ausgesetzt, die über die Zeit eine optimale Struktur in eine gewachsene, in der Regel suboptimale Struktur überführen (Abbildung 1).

Eine bestmögliche Ressourcennutzung lässt sich vor dem Hintergrund erheblicher Marktschwankungen bei gleichzeitig sinkender Vorhersagbarkeit nur durch die zeitlich befristete Nutzung von Betriebsmitteln erreichen. Um dieser Anforderung zu entsprechen, wurden verschiedene organisatorische Konzepte entwickelt, die einen flexibleren Ressourceneinsatz ermöglichen:

- **Outsourcing:**

Unter Outsourcing versteht man die Vergabe von Wertschöpfungsstufen an unabhängige Dritte. Dabei wird im Fall von Unterkapazitäten auf die Produktionsinfrastruktur und Arbeitsleistung Dritter zugegriffen. Im Extremfall kann mit dem Ziel der Kostenminimierung vollständig auf den Besitz entsprechender eigener Ressourcen verzichtet werden (FRIEDRICH 1996, S. 70 f.).

- **Temporäre Netzwerke / Virtuelle Fabriken:**

Bei dem Zusammenschluss rechtlich unabhängiger Unternehmen zu temporären Netzwerken werden nicht ausgelastete Produktionsressourcen nach Marktprinzipien anderen Unternehmen zur Verfügung gestellt, um im Rahmen einer zeitlich begrenzten, netzwerkartigen Zusammenarbeit Produktionsaufträge zu erledigen. Die Kooperation endet nach Abschluss des Auftrags (PICOT et al. 1996, S. 391 ff.).

- **Unternehmens-/werksübergreifende Nutzung von Ressourcen:**

Die beiden vorgenannten Produktionsstrategien basieren auf der Nutzung ortsgebundener Ressourcen durch den Eigentümer an einem Standort. Sind die Betriebsmittel mobil, d.h. ortsflexibel ausgelegt, so lässt sich auch deren zeitlich limitierter, unternehmensübergreifender Einsatz realisieren (POUGET 2000, S. 6 ff.).

▪ **Betreibermodelle:**

WILDEMANN (2004, S. 2) definiert Betreibermodelle als „jene Formen der Zusammenarbeit zwischen Unternehmen ..., bei denen ein Konzessionsgeber für eine bestimmte Periode an Dritte eine gültige Konzession zumindest für die Funktionen der Errichtung, des Betriebs und der Finanzierung von Investitionsgütern überträgt.“ Dabei lassen sich der Integrationsansatz, bei dem der Anlagenhersteller für den Betrieb der Anlage und die Lieferung der Erzeugnisse zuständig ist, und der Separationsansatz, bei dem ein externer Dienstleister diese Aufgaben übernimmt, unterscheiden (WIENDAHL & HARMS 2001b, S. 325).

Das Streben nach einer Harmonisierung der Produkt-, Prozess- und Gebäudelebenszyklen führt zu immer kürzer werdenden Fabriklebenszyklen (WIRTH et al. 2000). „Folglich darf die Planung einer Fabrik nicht mehr als einmaliges Projekt betrachtet werden, sondern die Fabrikplanung muss zu einem kontinuierlichen Prozess werden“ (NYHUIS et al. 2004, S. 95). So gehen WESTKÄMPER et al. (1997) davon aus, dass sich die Planungshäufigkeit von 1995 bis zum Jahr 2005 in produzierenden Unternehmen verdreifacht, während sich die zulässige Planungsdauer im gleichen Zeitraum um 75 % reduziert.

Dies erfordert zunächst die fortlaufende Überwachung des Produktionssystems im Hinblick auf veränderte Marktbedingungen. SCHUH et al. (2004) schlagen deshalb eine ständige Kontrolle der äußeren Rahmenbedingungen bei gleichzeitigem Abgleich mit den Eigenschaften des Produktionssystems vor, um auf diese Weise den erforderlichen Anpassungsbedarf des Produktionssystems zu erkennen. Die Bedeutung von Planungs- und Controllinginstrumenten für Unternehmen im Hinblick auf eine erfolgreiche Bewältigung turbulenter Umweltsituationen wurde von KROPFBERGER & MÖDRITSCHER (1999, S. 272 f.) empirisch nachgewiesen. Auf der Basis dieser Ortungssysteme wird die Planung von Anpassungsmaßnahmen zu einem kontinuierlichen Prozess (WIENDAHL et al. 1996; WESTKÄMPER 2000; ZÄH et al. 2003).

2 Zielsetzung der Arbeit

Die eingangs beschriebene Dynamik im Unternehmensumfeld erzeugt einen ständigen Anpassungsdruck innerhalb der Produktion. Aus der Forderung nach einer kontinuierlichen Adaption der Produktionsstrukturen leitet sich die Zielsetzung dieser Arbeit ab. Um den Lösungsraum auf ein sinnvolles Maß einzuschränken, wird im Folgenden zunächst der Untersuchungsbereich genauer spezifiziert. Dementsprechend wird die Zielsetzung weiter detailliert und die Vorgehensweise zur Zielerreichung erläutert.

2.1 Spezifizierung des Untersuchungsbereiches

Im Fokus der Betrachtungen dieser Arbeit stehen Unternehmen, deren Markt durch eine *hohe Unsicherheit* bzw. *geringe Prognostizierbarkeit* charakterisiert ist. Gleichzeitig werden nur solche Unternehmen betrachtet, die sich durch eine mittlere bis *hohe Produkt- bzw. Prozesskomplexität* auszeichnen. Zur Komplexität tragen in der Regel solche Produkte bei, die aus mehreren Einzelteilen und Baugruppen mit komplexen Verbindungen bestehen (Abbildung 2).

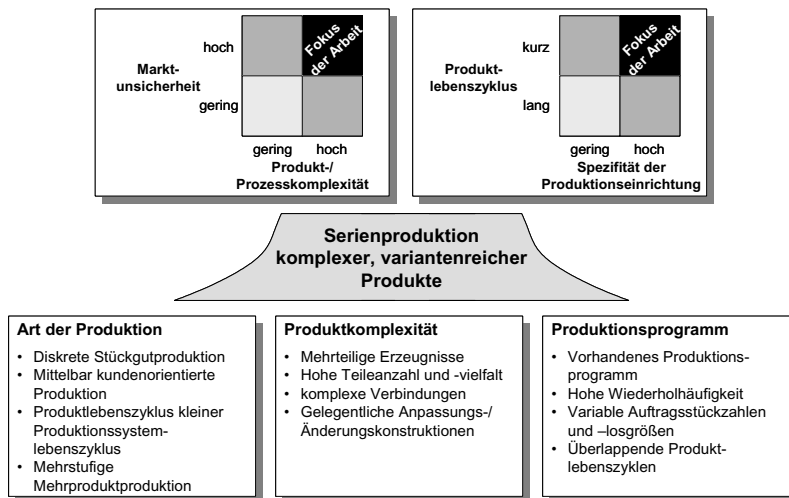


Abbildung 2: Eingrenzung des Untersuchungsbereichs (in Anlehnung an DOHMS 2001, S. 10)

2 Zielsetzung der Arbeit

Im Bereich der Einzelfertigung versucht man durch eine geringe Spezifität der Produktionseinrichtung und die geschickte Steuerung von Produktionsaufträgen die Herstellung kundenindividueller Produkte zu ermöglichen. Anpassungsaktivitäten beziehen sich daher vorwiegend auf die Erneuerung des Maschinenparks. Die Massenproduktion setzt aufgrund der notwendigen Investitionen bedingt durch einen hohen Automatisierungsgrad eine relativ konstante Nachfrage mit Standarderzeugnissen voraus. Die zu erarbeitenden Lösungen beziehen sich daher auf Unternehmen mit *Serienproduktion*.

Als Beispiel soll die Fertigung eines Automobilzulieferers herangezogen werden. Diese ist häufig durch ein stark heterogenes Produktspektrum gekennzeichnet. Einerseits werden Plattformteile in sehr hohen Stückzahlen geliefert, während auf der anderen Seite immer mehr Kleinserienprodukte für Nischensegmente entstehen. Diese Kleinserien befinden sich an der Grenze der Rentabilität, wenn sie wie bisher in die vorhandene Großserienproduktion integriert werden. Gleichzeitig ist es aus wirtschaftlichen Gründen kaum möglich, eine flexible Werkstattfertigung exklusiv für Kleinserien aufzubauen, da das Verhältnis zwischen Groß- und Kleinserie ständigen Schwankungen unterliegt. Hinzu kommt die Überlagerung der asynchronen Lebenszyklusphasen verschiedener Produkte, die wechselnde Gewichtungen sowohl bei der logistischen Schwerpunktsetzung innerhalb der Produktionsstrukturen als auch bei der Ressourcennutzung zur Folge hat. Das Beispiel zeigt, dass eine ideale Produktionsstruktur bezogen auf die aktuelle Situation nur temporär existieren kann, bevor Verschiebungen im Auftragspektrum eine Korrektur notwendig machen (REINHART & CISEK 2003, S. 77 f.).

Unter dem Begriff *Produktion* versteht man allgemein den „Einsatz und die Kombination von materiellen und immateriellen Gütern zur Herstellung und Verwertung anderer Güter“ (EVERSHEIM 1992, S. 2058 f.). Um die komplexen Zusammenhänge und Abhängigkeiten innerhalb der Produktion strukturiert darzustellen, wird häufig der systemtheoretische Ansatz gewählt. Ein *System* ist nach DIN 19226-1 eine „Anordnung von Gebilden (Elementen, Anm. d. Verf.), die miteinander in Beziehung (Relation, Anm. d. Verf.) stehen“ und die „durch eine Hüllfläche (Systemgrenze, Anm. d. Verf.) von ihrer Umgebung abgegrenzt“ sind. Das abstrakte Anordnungsmuster der Elemente, welches durch die Relationen gebildet wird, bezeichnet man als die *Struktur* des Systems (DAENZER & HUBER 1997, S. 6). Nach PATZAK (1982, S. 39) lassen sich folgende Strukturweisen unterscheiden:

▪ **Prozess-/Ablaufstrukturen:**

Abbildung der Flussrelationen und damit Austauschbeziehungen zwischen einzelnen Systemelementen (relationenorientierte Sichtweise)

▪ **Ordnungs-/Aufbaustrukturen:**

Beschreibung des Ordnungsgefüges und damit der Zugehörigkeit einzelner Elemente zu einer definierten Menge anhand spezifischer Eigenschaften (eigenschaftsorientierte Sichtweise)

Die Ermittlung des funktionellen Ablaufs der Produktion sowie die technologische und kapazitive Dimensionierung der Arbeitssysteme ist Teil der *Produktionsstrukturierung* (AGGTELEKY 1990a, S. 227). Hierbei lassen sich nach HENN & KÜHNLE (1996, S. 67) Strukturebenen in Abhängigkeit der Systemgrenzen unterscheiden, ausgehend von der Standortstruktur über die General-, Gebäude- und Bereichsstruktur bis hin zur Betriebsmittelstruktur (Abbildung 3). Im Mittelpunkt der Betrachtungen der vorliegenden Arbeit stehen die *Bereichs-* und *Betriebsmittelstruktur*.

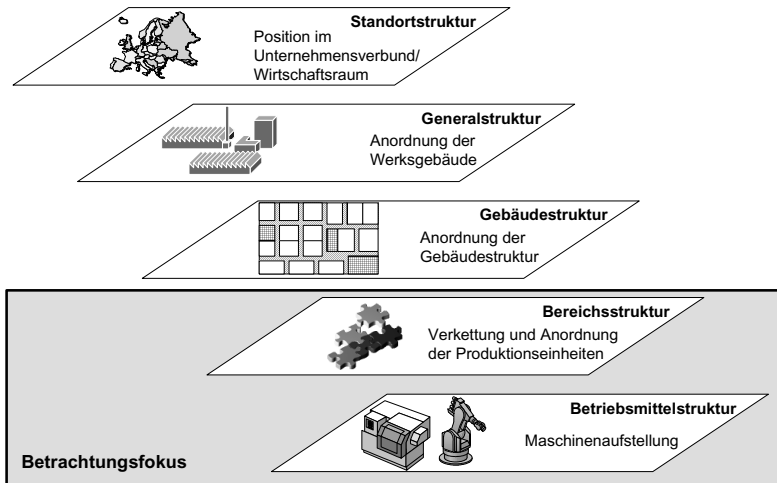


Abbildung 3: Strukturebenen eines Produktionssystems (in Anlehnung an HENN & KÜHNLE 1996, S. 67)

RUPPER (1991, S. 6) definiert die Logistik als „die Summe aller Tätigkeiten, durch die Funktionen der Zeit- und Raumüberwindung für Güter und Lebewesen, einschließlich der Betrachtung zugehöriger Informationen und Energien, unter

Verwendung von Arbeitskräften und Arbeitsmitteln in Systemen untersucht, geplant, realisiert und optimiert werden.“ Der Materialfluss als ein Teilgebiet der Logistik betrifft demnach nur Güter, d.h. Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (TEMPELMEIER 1988, S. 1 ff.). Die *Produktionslogistik* beinhaltet die „art- und mengenmäßige, räumlich und zeitlich abgestimmte Versorgung der betrieblichen Bedarfsträger“ (IHDE 1991, S. 215) und wird im Hinblick auf die erforderlichen Logistikressourcen im Rahmen dieser Arbeit mit berücksichtigt.

Die Ausprägung des Materialflusses ist abhängig von der Art und der Anzahl der produzierten Güter, den bereitgestellten Produktionsmitteln sowie der verwendeten Technologie. Darüber hinaus werden die Güterbewegungen durch die Transportmittel, die Konzeption des Fabrikgebäudes und in entscheidendem Maße durch die Anordnung der Maschinen und Lager innerhalb der Produktionsstätte beeinflusst. Die Gestaltung dieser Parameter ist als Teil der *Fabrikplanung*, die nach AGGTELEKY (1990, S. 26) die „technisch-wirtschaftlich optimalen Voraussetzungen für die Fertigung eines vorgegebenen Produktprogrammes“ ermittelt, ein wesentlicher Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Ein Aspekt der Fabrikplanung ist die *Layoutplanung*. Sie befasst sich mit der Fragestellung, „wie eine Menge ortsgebundener Betriebsmittel auf einer i.d.R. vordefinierten Fläche dauerhaft angeordnet werden soll“ (WÄSCHER 1994, S. 249). Ihre Betrachtung ist somit ebenfalls Teil der Aufgabenstellung.

2.2 Forschungsziel

Die Turbulenz im Unternehmensumfeld und deren Auswirkungen auf die Effizienz der Produktionsstruktur stellt das Ausgangsproblem der vorliegenden Arbeit dar. Eine ideale Produktionsstruktur kann nur temporär existieren, bevor Veränderungen der äußeren Gegebenheiten eine Anpassung notwendig machen. Demgegenüber stehen Investitions- und Allokationsentscheidungen, die bisher eher langfristig ausgerichtet sind und auf weit reichenden Planungsprognosen beruhen. Die Folge ist, dass in einzelnen Bereichen erhebliche Leerkosten verursacht werden, während auf der anderen Seite Kapazitätsengpässe auftreten. Eine Lösungsmöglichkeit bietet die temporäre Anpassung der Produktionsstruktur an das aktuelle Auftragspektrum.

Ziel dieser Arbeit ist daher die Planung und Bewertung kontinuierlicher Rekonfigurationsprozesse. Dies erfordert eine fortwährende Beurteilung der Produktionsstruktur und ergibt eine enge Verknüpfung zwischen Fabrikplanung und Pro-

duktionssteuerung. Dabei muss zwischen kurzfristigen Schwankungen und mittel- bis langfristigen Trends unterschieden werden.

Veränderungen des Produktionsprogramms wirken sich direkt auf den Kapazitätsbedarf aus. Die Bereitstellung der notwendigen Potenzialfaktoren manifestiert sich in Fixkosten. Auslastungsabhängig ergeben sich steigende bzw. fallende Deckungsbeiträge. Daher wird eine Planungssystematik entwickelt, die in Abhängigkeit der Produktionsprogrammentwicklung das Kapazitätsangebot und damit die Fixkostenstruktur optimiert. Die für die betriebliche Leistungserstellung benötigten Ressourcen sind in einer Weise bereitzustellen, dass die unternehmerischen Zielsetzungen mit minimalem Aufwand erreicht werden.

Die Kapazität eines Produktionssystems wird über die Art und Anzahl der bereitgestellten Ressourcen determiniert. Anpassungen der Betriebsbereitschaft erfolgen u.a. über Eingriffe in die Betriebsmittelstruktur. Dies bleibt in der Regel nicht ohne Folgen für den Materialfluss und erfordert eine Modifikation des Produktionslayouts. Die zu entwickelnde Planungssystematik umfasst daher auch eine rechnerbasierte Unterstützung der Layoutplanung.

Die so ermittelten Strukturalternativen werden anschließend einer monetären Bewertung unterzogen. Die finanziellen Konsequenzen lassen sich unter Berücksichtigung von Bindungsfristen und Vorlaufzeiten direkt aus der Anpassung der Kapazitätsstruktur ableiten. Die Beurteilung des Aufwands bei der Migration der bestehenden Produktionsstruktur in ein geplantes Szenario erfolgt bisher überwiegend situativ. Die projekthafte Bewertung des Rekonfigurationsaufwands wird im Rahmen dieser Arbeit in einen systematisch unterstützten Prozess überführt.

Die zu erarbeitende Planungsmethodik soll dabei nicht eine detaillierte Feinplanung bis hin zur konkreten Umsetzung ersetzen. Das Ziel ist vielmehr eine hinreichend exakte Grobplanung als Entscheidungsgrundlage für notwendige Anpassungsinvestitionen im Sinne einer erweiterten Vorstudie. Die aus dieser Zielsetzung abgeleitete Aufgabenstellung lässt sich wie folgt zusammenfassen: Entwicklung einer ganzheitlichen Methodik zur

- Identifikation des Bedarfs zur Rekonfiguration der Produktionsstruktur,
- Optimierung der Kapazitätsstruktur in Abhängigkeit der Produktionsprogrammentwicklung und

- Bewertung des monetären Nutzens von Strukturalternativen unter Berücksichtigung des Aufwands zur Rekonfiguration.

2.3 Vorgehensweise

Aufbauend auf der in Kapitel 1 beschriebenen Ausgangsproblematik wurde in diesem Kapitel der zu untersuchende Betrachtungsraum spezifiziert und die Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitet. Zur Erreichung der Zielsetzung wird die in Abbildung 4 dargestellte Gliederung gewählt.

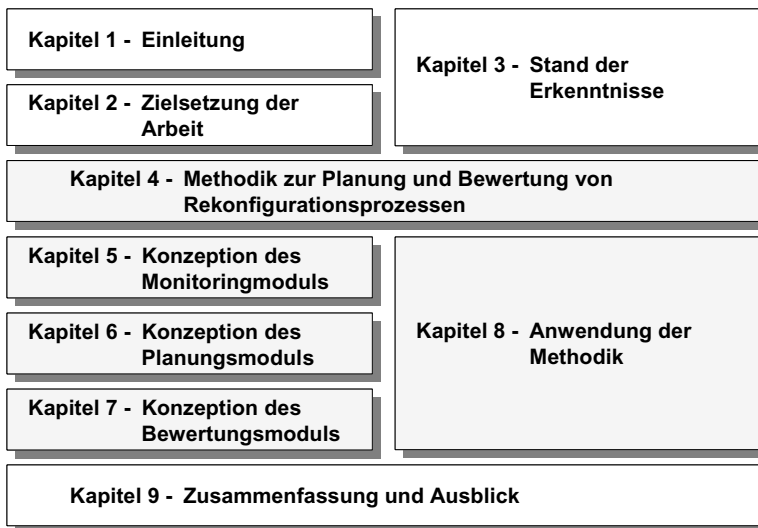


Abbildung 4: *Aufbau der Arbeit*

Die Untersuchung bestehender Lösungsansätze und die Bewertung ihrer Anwendbarkeit im Sinne der vorliegenden Aufgabenstellung erfolgt in Kapitel 3. Dazu werden die für diese Arbeit bedeutenden Ansätze zur Überwachung und Kontrolle der Produktionseffizienz, zur Planung von Produktionssystemen und zur monetären Bewertung produktionsorientierter Entscheidungen vorgestellt und hinsichtlich ihrer Einsetzbarkeit für die Planung und Bewertung kontinuierlicher Rekonfigurationsprozesse in der Produktion diskutiert. Aus dem identifizierten Handlungsbedarf werden in Kapitel 4 die Anforderungen an die zu entwickelnde Planungsmethodik und deren Aufbau abgeleitet.

Entsprechend der in diesem Kapitel formulierten Aufgabenstellung erfolgt die Konzeption einer durchgängigen Planungsmethodik in drei Stufen. In Kapitel 5 wird zunächst ein Monitoringmodul entwickelt, mit dessen Hilfe der Bedarf einer Strukturadaption identifiziert werden kann. Die Vorgehensweise zur Erstellung von Strukturalternativen und deren Umsetzung wird in Kapitel 6 im Rahmen der Konzeption eines Planungsmoduls ausgeführt. Die Bewertung der finanziellen Konsequenzen von Anpassungsentscheidungen ist Teil des in Kapitel 7 beschriebenen Bewertungsmoduls.

Kapitel 8 befasst sich mit der Anwendung der entwickelten Planungsmethodik. Dazu werden Richtlinien für die ablauf- und aufbauorganisatorische Einbindung der Methodik gegeben. Darüber hinaus wird die prototypische Umsetzung einer rechnerbasierten Anwendungsunterstützung vorgestellt und der Nutzen des Methodeneinsatzes kritisch gewürdigt.

Eine Zusammenfassung der wesentlichen Aspekte der erarbeiteten Planungsmethodik sowie ein Ausblick auf den zukünftigen Forschungsbedarf bilden in Kapitel 9 den Abschluss dieser Arbeit.

3 Stand der Erkenntnisse

In diesem Kapitel werden relevante Vorarbeiten bezüglich der Aufgabenstellung analysiert. Unter informationsorientierten Ansätzen werden Konzepte zusammengefasst, die Anregungsinformationen hinsichtlich einer notwendigen Strukturveränderung liefern. Planungsorientierte Ansätze befassen sich mit der Erstellung von Strukturalternativen. Arbeiten, die einen potenziellen Beitrag zur Bestimmung der finanziellen Konsequenzen von Strukturszenarien leisten, werden als bewertungsorientierte Ansätze eingehend behandelt.

3.1 Informationsorientierte Ansätze

Der erste Schritt bei der Planung von Rekonfigurationsprozessen ist die Identifikation eines Bedarfs zur Strukturadaption. Nachfolgend sind zunächst die Grundlagen eines produktionsorientierten Controllings zusammengefasst. Im Anschluss werden einzelne Vorarbeiten, die sich mit der Konzeption von Kennzahlensystemen im Bereich der Produktion auseinander setzen, auf ihre Eignung für die vorliegende Aufgabenstellung untersucht.

3.1.1 Controllingkonzepte in der Produktion

REICHMANN (1985, S. 888 f.) und HEIGL et al. (1989, S. 3) definieren Controlling als Beschaffung, Aufbereitung und Koordination von Informationen. Nach REICHMANN (1997, S. 3) sind die wesentlichen Ziele des Controlling „die Unterstützung der Planung, die Koordination einzelner Teilbereiche sowie die Kontrolle der wirtschaftlichen Ergebnisse“.

Die Aufgabe des Produktionscontrollings ist in erster Linie die Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit der Produktionsprozesse. Eine wesentliche Funktion ist daher die Überwachung der Produktionskosten, um bei negativer Entwicklung möglichst direkt bereichsbezogene Gegensteuerungsmaßnahmen einzuleiten (REICHMANN 1997, S. 277). Zusätzlich zur laufenden Wirtschaftlichkeitskontrolle müssen ungenutzte Kapazitäten identifiziert werden, um Leerkosten abzubauen bzw. einen möglichst hohen Nutzkostenanteil zu erreichen. Leerkosten entstehen durch den Fixkostenanteil, der durch die Ist-Beschäftigung im Verhältnis zur maximal möglichen (bzw. normal genutzten) Kapazität nicht ausgenutzt wird. Analog bezeichnen die Nutzkosten den Fixkostenanteil bezogen auf die tatsächli-

3 Stand der Erkenntnisse

che Beschäftigungssituation (HABERSTOCK 1986, S. 352). Entgegen des ursprünglich fokussierten Kontrollziels und die daran anknüpfende Wirtschaftlichkeitskontrolle lassen sich im Bereich des Controllings inzwischen auch Verschiebungen in Richtung der Planungsunterstützung und Koordination erkennen (HORVÁTH 1992, S. 142; REICHMANN 1997, S. 3).

Vor dem Hintergrund eines zielgerichteten Handelns von Wirtschaftssubjekten hat das Produktionscontrolling die Aufgabe, Soll-Ist-Abweichungen zu ermitteln, um gegebenenfalls bei Zielabweichungen rechtzeitig Gegensteuerungsmaßnahmen vornehmen zu können. Im Mittelpunkt steht dabei die Differenz zwischen Ist- und Plankosten, die als Gesamtabweichung bezeichnet wird. Da das Produktionscontrolling in erster Linie darauf abzielt, Ineffizienzen im Produktionsbetrieb festzustellen, müssen zunächst die Kostenbestandteile herausgefiltert werden, die nicht auf die suboptimale Nutzung der Produktionsressourcen zurückzuführen sind. Dazu zählen die Auswirkungen außerbetrieblicher Preisschwankungen, die über die Preisabweichung definiert werden (Abbildung 5). Damit die vorgegebenen Plankosten als Bewertungsmaßstab herangezogen werden können, müssen die Vorgabewerte an den tatsächlichen Beschäftigungsgrad angepasst werden. Die dementsprechend auf die Ist-Beschäftigungsgrade umgerechneten Plankosten werden Sollkosten genannt (HABERSTOCK 1986, S. 10). Der Soll-Ist-Kostenvergleich zwischen den mit Planpreisen bewerteten Ist-Kosten und den Sollkosten ergibt die Abweichung der effektiv verbrauchten Faktoreinsatzmengen von den wirtschaftlich vorgegebenen Faktorgrößen an. Diese wird als Verbrauchsabweichung bezeichnet und dient als Maßstab innerbetrieblicher Ineffizienz (HABERSTOCK 1986, S. 264). Die Bedeutung von Plan-Ist- bzw. Soll-Ist-Kontrollen und Abweichungsanalysen nimmt jedoch mit steigenden Fixkosten ab. Bei entsprechender Fixkostenhöhe wird die Kostenentwicklung vorwiegend durch Entscheidungen über den Aufbau, die Beibehaltung und den Abbau von Kapazitäten dominiert. Die über Soll-Ist-Vergleiche sinnvoll steuerbaren Kosten tendieren in diesem Fall gegen Null (GLASER 1992, S. 280).

Gerade vor dem Hintergrund einer sinkenden Prognostizierbarkeit von Absatzentwicklungen kommt der Identifikation von Beschäftigungsabweichungen eine besondere Rolle zu. Die Ermittlung der Beschäftigungsabweichung wird häufig unter dem Begriff der Nutz- und Leerkostenanalyse zusammengefasst. Dabei werden die Auswirkungen bei Über- bzw. Unterbeschäftigung untersucht. Im Fokus dieser Arbeit steht daher eine beschäftigungsorientierte Kostenüberwachung.

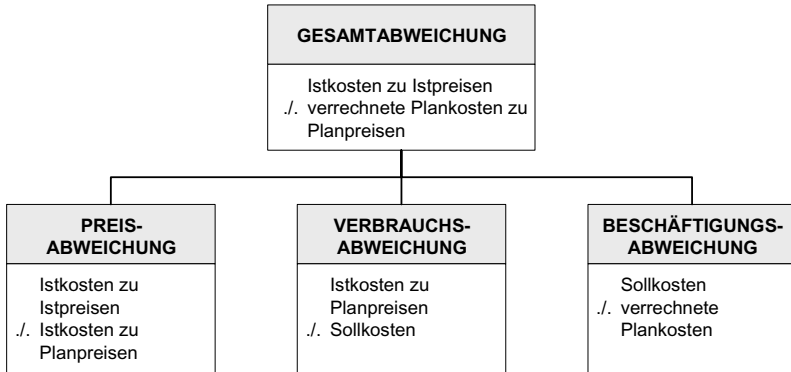


Abbildung 5: Systematik der Kostenabweichung (in Anlehnung an REICHMANN 1997, S. 288)

3.1.2 Kennzahlensysteme für die Produktion

Als das wesentliche Hilfsmittel zur Informationsbeschaffung und -aufbereitung werden *Kennzahlen* herangezogen. Mit ihrer Hilfe können Veränderungen im betrieblichen Ablauf aufgezeigt und darüber Maßnahmen zur Verbesserung abgeleitet werden. „Kennzahlen sind betrieblich relevante, numerische Informationen“ (BÜRKELE 1977, S. 6). Nach KÜTING (1983, S. 237) können sie als „hochverdichtete Messgrößen, die als Verhältniszahlen oder absolute Zahlen in einer konzentrierten Form über einen zahlenmäßig erfassbaren Sachverhalt berichten“, verstanden werden. Sie dienen zur Analyse der Unternehmenssituation und stellen „unentbehrliche Informationen für die Lenkung der Unternehmung“ bereit (SIEGWART 2002, S. 13). Somit können Kennzahlen Schwachstellen im Unternehmen aufzeigen und die Einleitung von Änderungsprozessen unterstützen (SIEGWART 2002, S. 24).

Nach REICHMANN & LACHNIT (1977, S. 45) wird unter einem *Kennzahlensystem* im Allgemeinen „eine Zusammenstellung von quantitativen Variablen verstanden, wobei die einzelnen Kennzahlen in einer sachlich sinnvollen Beziehung zueinander stehen, einander ergänzen oder erklären und insgesamt auf ein gemeinsames übergeordnetes Ziel ausgerichtet sind.“

Kennzahlensysteme können als Instrument zur Frühwarnung eingesetzt werden, um potenzielle Gefährdungen zu erkennen und möglichst frühzeitig Gegenmaßnahmen innerhalb der lokalisierten Problembereiche zu initiieren (RIESER 1980,

S. 32). Eine Abweichungsanalyse darf sich jedoch nicht auf einzelne Spitzenkennzahlen beschränken. Vielmehr ist eine differenzierte Kennzahlenzerlegung notwendig, um gegebenenfalls kompensatorische Effekte und deren Auswirkungen erfassen und daraus geeignete Korrekturmaßnahmen ableiten zu können (MÜLLER-MERBACH 1979). Nachfolgend werden aktuelle Kennzahlensysteme untersucht, die explizit zur Beurteilung eines Produktionssystems konzipiert wurden.

SYSKA (1990) entwickelt speziell für den Bereich der Logistik eine Vorgehensweise zur Konzeption eines Kennzahlensystems. Er differenziert innerhalb eines Zielsystems die Hauptziele Logistikkosten und Logistikleistung. Für jedes Teilziel werden weitere Kennzahlen definiert, um systematisch Verbesserungspotenziale lokalisieren zu können. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt in der Entwicklung einer Methodik zur Erstellung eines betriebsspezifischen Kennzahlensystems für das Logistikcontrolling. Die im Rahmen eines Anwendungsbeispiels definierten Größen stimmen weitgehend mit den Logistikkennzahlen der VDI-Richtlinie 4400 (2000) überein. Aufgrund der Fokussierung auf logistische Zusammenhänge ist das vorgestellte Kennzahlensystem nur bedingt auf die Überwachung der Produktionsstruktur übertragbar. Positiv ist hier die Zielsystematik zur Verdeutlichung von Interdependenzen hervorzuheben.

Auf der Basis eines Regelkreises definiert LOEPER (1995) ein kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung, das aus einer Kontroll-, einer Anregungs- und einer Operationalisierungsfunktion besteht. Mit Hilfe der Kontrollfunktion werden Abweichungen der Logistikeffizienz erkannt. Die Anregungsfunktion ermittelt anschließend mögliche Abweichungsursachen. Detailziele für Korrekturmaßnahmen werden innerhalb der Operationalisierungsfunktion quantifiziert und einer weiteren Bewertung zugeführt. Die Fokussierung auf die marktrelevanten Größen Kosten und Lieferzeit als Hauptziele (neben der Qualität) erscheint äußerst sinnvoll. Darüber hinaus leisten die Überlegungen zur Trendanalyse einen wichtigen Beitrag bei der Unterscheidung kurzfristiger Leistungsschwankungen von mittel- bis langfristigen Entwicklungen der Produktionseffizienz. Allerdings wird in diesem Zusammenhang das Produktionsumfeld, d.h. die Marktentwicklung, als maßgeblicher Treiber für Rekonfigurationsprozesse ausgeblendet. Das System der Kostenerfassung basiert auf der relativen Einzelkostenrechnung nach RIEBEL (1983, 1994), ohne deren Defizite auszugleichen (vgl. Abschnitt 3.3.1.4 und 3.3.1.7).

Speziell für die Elektronikfertigung stellt EHMANN (1993) ein konfigurierbares Kennzahlensystem vor. Die betrieblichen Strukturen werden auf den Ebenen Produkt, Zustand und Arbeitsgang modelliert. Diese Ebenen spezifizieren sämtliche Zustände für die zu bearbeitenden Lose in der Fertigung. Der Kreuzungspunkt der Ebenen repräsentiert den aktuellen Zustand eines Loses im betrachteten Zeitabschnitt. Anhand der Werte Zeitverbrauch, Termine, Mengen und Kosten werden kritische Produkte zur Eingrenzung des Problembereichs bestimmt. Für die auftragsbezogenen Abweichungsanalysen sind jedoch aufwändige Protokollierungen der Ist-Bearbeitungsabläufe einzelner Lose erforderlich. Aufgrund der ablauforientierten Sichtweise entlang der Prozesskette ist eine Übertragbarkeit auf die Strukturüberwachung nur eingeschränkt möglich und wird vom Autor explizit ausgegrenzt.

MEIER & HANENKAMP (2003, S. 271) sprechen von der Notwendigkeit, ein „flexibles Monitoringsystem zur Unterstützung einer permanenten Fabrikplanung zu entwickeln“. Zentrales Element ihres Konzepts ist die Konfiguration von Stell- und Messgrößen, die in einem integrierten Regelkreis dem Fabrikplaner anzeigen, neue Planungen zu initialisieren. Dazu dient ein objektorientierter Baukasten, der einerseits einen strukturbeschreibenden Konfigurator und andererseits ein Prozessreferenzmodell enthält, in dem dynamische Zusammenhänge der im Konfigurator enthaltenen Elemente festgelegt werden. Das vorgestellte Konzept bildet lediglich einen Rahmen für die programmtechnische Umsetzung eines regelkreisbasierten Monitoringsystems zur Optimierung der Produktionsleistung. So ermöglicht der Konfigurator eine anwenderspezifische Sichtweise, die den Fabrikplaner bei der Auswahl geeigneter Mess- und Stellgrößen unterstützt, ohne jedoch konkrete Hinweise für die zielgerichtete Zusammenstellung von Kennzahlen zu geben (MEIER & HANENKAMP 2003).

Die Untersuchung informationsorientierter Ansätze zeigt, dass Kennzahlensysteme in der Regel auf das Erkennen ablaufbedingter Abweichungen abzielen. Die verwendeten Kennzahlen unterscheiden sich voneinander nur marginal bzw. in den unterstellten Wirkzusammenhängen. Im Hinblick auf die Identifikation eines Strukturanpassungsbedarfs sind die strukturelevanten Kennzahlen in einem eigenen transparenten Kennzahlensystem zusammenzufassen.

3.2 Planungsorientierte Ansätze

Um eine zielorientierte Planung zu erreichen, ist es erforderlich, sämtliche zwischen einzelnen Teilplänen und zwischen einzelnen Planungsphasen des Gesamtplans bestehenden Abhängigkeiten zu erfassen. Während bei einseitigen Abhängigkeiten (Dependenzen) die Ausprägungen der betrachteten Variablen noch sukzessiv bestimmt werden können, lassen sich diese Ausprägungen bei wechselseitigen Abhängigkeiten (Interdependenzen) nur noch simultan ermitteln (ADAM 1996, S. 168 ff.). So sind für die Bestimmung des optimalen Produktionsprogramms die Stückkosten und Produktionskoeffizienten erforderlich, die erst nach erfolgter Produktionsprozessplanung vorliegen, wenn die Potenzialfaktoren und die Intensität ihres Einsatzes bekannt sind. Gleichzeitig ist die Aufteilung der Produktionsaufgaben auf die Potenzialfaktoren nur bei feststehendem Produktionsprogramm möglich. Außerdem lassen sich die tatsächlich verfügbaren Kapazitäten erst ermitteln, wenn die ablaufbedingten Stillstandszeiten bekannt sind (ROLLBERG 2002, S. 131 f.).

So gilt nach ROLLBERG (2001, S. 128) auch in der Produktionswirtschaft das Planungsdilemma, nach dem Entscheidungsmodelle in der Regel entweder „wirklichkeitsnah und lösungsdefekt oder wirklichkeitsfern und lösbar“ sind. In der Regel wird versucht, die Defizite einer (realisierbaren) Sukzessivplanung durch die Generierung von Lösungsalternativen und etwaige Rückkopplungsmechanismen zu überwinden (ZÄPFEL & GFRERER 1984). Ziel muss es daher sein, die Erzeugung und Bewertung einer Alternativenauswahl bereits in einer frühen Phase des Planungsprozesses beschleunigend zu unterstützen, um den Aufwand für die Detailplanung auf sinnvolle Lösungsmöglichkeiten zu beschränken.

3.2.1 Allgemeine Planungsansätze

Die Aufgabe der Fabrikplanung als ein Teilgebiet der Unternehmensplanung ist im Wesentlichen die optimale Gestaltung und Verwirklichung von Investitionsvorhaben. Auslöser für diese Gestaltungsprozesse können sowohl eine völlige Neuplanung von Produktionsstätten als auch die Umstellungs- und Erweiterungsplanung bestehender Betriebe sein (KETTNER et al. 1984, S. 3; AGGTELEKY 1990a, S. 29). Die angesprochenen Fabrikplanungsanlässe beziehen sich jedoch weitestgehend auf einmalige Planungsprojekte. Eine kontinuierliche Strukturoptimierung wird nicht berücksichtigt.

Um eine kontinuierliche Modifikation der Fabrikstrukturen zu erreichen, hat UEDA (1992) das Konzept der *Biological Manufacturing Systems* (BMS) entwickelt. Dabei verwenden UEDA et al. (1997) durch die Biologie inspirierte Ideen wie z.B. Selbstorganisation, Selbstwachstum und Evolution. Produktanforderungen werden durch DNA-artige Informationen repräsentiert, während Produktionsressourcen BN-(Brain-Neuron-)artige Informationen nutzen, um Teile zu Produkten weiterzuentwickeln. Das System wird durch den Einsatz von Kraftfeldern (anziehend/abstoßend) kontrolliert. Jede Produktionseinheit erzeugt entsprechend ihrer Prozessfähigkeiten ein Kraftfeld, auf das bestimmte Teile reagieren.

So lassen sich simulationsgestützt auf der Basis des verteilten Ansatzes Rekonfigurationsprozesse kontinuierlich und autonom darstellen. Jedoch wird auf die Repräsentation der Prozessfähigkeiten und der Produktanforderungen bei realen Produktionsaufgaben nicht eingegangen. Gleichzeitig sind die erzeugten Lösungen für den Planer kaum nachvollziehbar. Auch ist die Sensitivität, mit der das System auf Veränderungen reagiert, nicht hinreichend geklärt.

Die im Zusammenhang mit BMS vielfach erwähnten Konzepte der *Holonic Manufacturing Systems* (vgl. KOESTLER 1967; SIMON 2001) und der *Fraktalen Fabrik* (vgl. WARNECKE 1993; THARUMARAJAH et al. 1996) werden im Rahmen dieser Arbeit nicht näher beleuchtet, da sie lediglich organisatorische Rahmenkonzepte darstellen, um eine kontinuierliche Adaption zu ermöglichen. Auf die Planung konkreter Rekonfigurationsprozesse wird in der Literatur nicht explizit eingegangen. Häufig wird auf marktbasierende Planungsmechanismen, wie sie bei Agentensystemen zum Einsatz kommen, verwiesen (IWATA et al. 1994; SAAD 2003).

SPATH et al. (2002) stellen einen Ansatz zur Planung von Fabriken mit Hilfe einer Fabriktypologisierung und eines Strukturbaukastens vor. Besonderes Merkmal ist dabei die Berücksichtigung der Wandlungsfähigkeit als individuelle Zielgröße durch die Identifikation der entsprechenden Wandlungstreiber. Die Wandlungstreiber werden über den Vergleich von Randbedingungen, die Dynamik von Veränderungen und die Einflussfaktoren auf verschiedenen Zielebenen identifiziert, um anhand ihrer Ausprägung spezifische Fabriktypen zu klassifizieren. Diesen Typen werden entsprechend den Anforderungen und Zielen vorkonfigurierte Lösungen aus dem Strukturbaukasten zugeordnet. Die Attribute dieser Bausteine werden jedoch nur allgemein zusammengefasst, ohne konkrete Ausprägungen aufzuzeigen.

3 Stand der Erkenntnisse

Die Wandlungsfähigkeit einer Fabrik ist eine Grundvoraussetzung, um Rekonfigurationsprozesse aufwandsarm durchführen zu können. Als Zielgröße ist sie daher eher der Initialplanung bzw. umfassenden Restrukturierungsprojekten zuzuordnen. Als bestimmender Faktor bei der Planung kontinuierlicher Veränderungsprozesse eignet sie sich demnach nur bedingt. Die Definition vordefinierter Strukturbausteine dient vorwiegend als Hilfsmittel zur Beschleunigung der Planung. Eine methodische Unterstützung, wie sie SPATH et al. (2002, S. 30) selbst fordern, wird im Sinne der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit nicht hinreichend zur Verfügung gestellt.

Eine ähnliche Zielsetzung verfolgt auch HERNÁNDEZ MORALES (2003). Unter Einsatz der Szenario-Technik werden die aus der Geschäftsstrategie abgeleiteten Ziele, Strategien und Visionen in fabrikplanerische Handlungsfelder überführt, um die Wandlungsfähigkeit der Fabrikstrukturen dem potenziellen Wandlungsumfang anzupassen. Der Wandlungsumfang wird aus den mit Hilfe des Szenario-Managements gewonnenen Projektionen abgeleitet. Bei Berücksichtigung mehrerer Szenarien wird so eine zukunftsrobuste Fabrikplanung erreicht. Dafür wird das Gestaltungsfeld Fabrik in Komponenten wie z.B. Gebäude untergliedert, denen die jeweiligen Wandlungsobjekte (z.B. Tragwerk, Medien) zugeordnet sind. Im Rahmen einer Auswirkungsanalyse werden die von den erarbeiteten Projektionen betroffenen Wandlungsobjekte identifiziert, um daraus entsprechende Lösungen abzuleiten.

Obwohl der Ansatz eine wertvolle methodische Unterstützung bei der Planung zukunftsrobuster Fabriken bietet, ist er für die in dieser Arbeit verfolgte Aufgabenstellung nicht geeignet. Nach WIENDAHL et al. (2002, S. 15) eignet sich das Szenario-Management für den Einsatz in der Fabrikplanung „insbesondere bei der Frage der Planung mittel- bis langfristiger Wandlungsfähigkeit“. Somit gelten die gleichen Einschränkungen wie bei dem Konzept von SPATH et al. (2002).

Im Vordergrund der integrativen modularen Produktionssystemplanung von FÖRSTER et al. (2001) stehen der Einsatz rechnergestützter Verfahren sowie die Integration von Planungsschritten. Die Basis bildet ein Produktionsdatenmodell, mit dem die im Planungsprozess benötigten und entstehenden Daten effektiv verwaltet werden können. Gleichzeitig bilden die Produktionsdatenbank und ihre Adaptionsschicht für verschiedene Rechnerwerkzeuge ein Lösungskonzept für eine rechnergestützte Produktionssystemplanung auf der Basis zu koppelnder Software. Mit Hilfe der entwickelten Softwaresysteme werden Planungsschritte integriert und automatisch durchgeführt. Wesentlicher Bestandteil ist dabei die

simultane Dimensionierung sowie die hierarchische und räumliche Strukturierung des Produktionssystems auf der Grundlage evolutionärer Algorithmen. Im Anschluss daran erfolgt eine weitere Verfeinerung des Planungsergebnisses durch eine simulationsgestützte dynamische Dimensionierung. Kernziel ist die kapazitive Auslegung der Ressourcen unter Berücksichtigung der vorgegebenen Durchlaufzeitrestriktionen.

Der Ansatz bietet wertvolle Anregungen für die Entwicklung einer Methodik zur Planung kontinuierlicher Rekonfigurationsprozesse. Das vorgestellte Produktionsdatenmodell bildet eine gute Grundlage für die zu erwartenden Planungsaufgaben. Auch die Integration der Planungsschritte führt zu einer Verlagerung der planerischen Tätigkeit von der Lösungssuche auf die Lösungsbewertung im Sinne dieser Arbeit. Dennoch erhöht der verteilte Einsatz von Softwaresystemen die Komplexität und führt unter Umständen zu einer Verlangsamung im Planungsprozess. Darüber hinaus bleiben die bei Umplanungen auftretenden Rekonfigurationsaufwände unerwähnt. Eine detaillierte Beschreibung einer angepassten Kosten- und Leistungsrechnung im Hinblick auf die Veränderbarkeit der Fixkostenstruktur findet ebenfalls nicht statt.

3.2.2 Rechnerunterstützte Planungsansätze

Im Zuge der Fortschritte im Bereich der Computertechnologie wurde eine Vielzahl von Ansätzen zur rechnerunterstützten Fabrikplanung entwickelt. Ein Großteil dieser Arbeiten konzentriert sich dabei auf den Aspekt der Layoutplanung. Gründe dafür sind sicherlich die klare Zieldefinition der Aufgabenstellung (Minimierung der durch die räumliche Anordnung von Produktionsressourcen induzierten Kosten), die einfache Definition der Eingangsgrößen (Produktionsprogramm, Transportmatrix) sowie die Möglichkeit zur Beschreibung von Restriktionen (Platzbedarf, Nachbarschaftsbeziehungen).

„Die Layoutplanung hat die wichtige Aufgabe, die überwiegend abstrakten Planungsergebnisse der Strukturplanung, der Materialfluss- und Flächenplanung in konkrete, grundrissmäßig und räumlich definierte Form zu bringen“ (AGGTELEKY 1990b, S. 586). Nach KETTNER et al. (1984, S. 226) wird „unter ‚Layout‘ die Anordnung von betrieblichen Funktionseinheiten verstanden.“ Die Effizienz der Anordnung von Maschinen und Betriebsmitteln innerhalb der Fabrik wird in der Regel über die Materialhandhabungskosten definiert.

3.2.2.1 Allgemeine Grundlagen

Zur Lösung des Layoutproblems wurden vorwiegend drei mathematische Ansätze verwendet. Das *Quadratische Zuordnungsproblem* von KOOPMANS & BECKMANN (1957) wurde als erstes auf ein Layoutproblem übertragen. Nachfolgende Verfahren basierten auf dem *Graphentheoretischen Modell* von HARARY (1972) oder FOULDS & ROBINSON (1978). Neuere Ansätze basieren auf der *Gemischt-ganzzahligen Optimierung* von MONTREUIL (1990) (vgl. auch Abschnitt 11.1).

Bei den Lösungsverfahren muss zwischen *exakten* und *heuristischen Verfahren* unterschieden werden. Exakte Verfahren sind nach DOMSCHKE (1975, S. B14) dadurch charakterisiert, dass sie nach endlich vielen Schritten das Optimum aus einer Lösungsmenge ausfindig machen oder den Nachweis für die Unlösbarkeit des Problems erbringen. Diese Verfahren beruhen auf dem Prinzip der vollständigen Enumeration, d.h. es werden alle möglichen Lösungen lokalisiert und verglichen, um daraus die beste Lösung zu extrahieren. Ein wesentlicher Nachteil dieser Verfahren ist trotz der Leistungsfähigkeit aktueller Computersysteme der eingeschränkte Lösungsraum. So geben SOLIMANPUR et al. (2004, S. 593) eine maximale Obergrenze von 25 Objekteinheiten an, die mit exakten Modellen angeordnet werden können.

Heuristische Verfahren schließen beim Suchprozess systematisch einzelne Lösungen aus. Da somit auch potenziell bessere Lösungspfade ausgeschlossen werden können, ist es möglich, dass die so erzeugte Lösung nicht das Optimum darstellt. Die gefundenen Lösungen müssen daher in der Regel als suboptimal bezeichnet werden. Ein entscheidender Vorteil ist jedoch die Tatsache, dass durch die geschickte Einschränkung des Lösungsraums auch umfangreiche Problemstellungen gelöst werden können (BOGATZKI 1998, S. 21 ff.). Einige der heuristischen Algorithmen (vgl. Abbildung 6) greifen Sachverhalte aus der Biologie auf (z.B. ant colony optimization, genetic algorithms, genetic programming), andere sind auf physikalische Sachverhalte zurückzuführen (z.B. simulated annealing). Weitere Verfahren beruhen auf rein mathematischen Überlegungen (z.B. tabu search, cutting planes).

Gerade in einem dynamischen Produktionsumfeld ist der Materialfluss über die Zeit nicht konstant, sondern unterliegt einer kontinuierlichen Veränderung. Bereits 1986 schlug ROSENBLATT einen Ansatz zur Modellierung des *Dynamic Facility Layout Problems (DFLP)* vor. Im Gegensatz zur statischen Betrachtung

(*Static Facility Layout Problem, SFLP*) wird dabei die Veränderung des Materialflusses über mehrere Planungsperioden hinweg berücksichtigt.

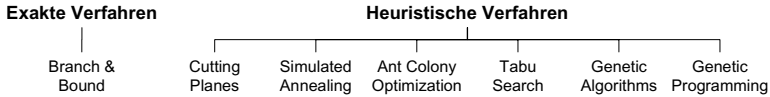


Abbildung 6: Übersicht der Lösungsverfahren zur Layoutplanung

Im Folgenden werden einige ausgewählte Lösungsverfahren vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung für die vorliegende Aufgabenstellung untersucht (vgl. Abschnitt 11.2). Eine umfangreiche Übersicht der vorhandenen Verfahren findet sich bei MELLER & GAU (1996, SFLP), BALAKRISHNAN & CHENG (1998, DFLP), BOGATZKI (1998, SFLP) und CHIANG (2001, SFLP).

3.2.2.2 Das Verfahren von Lacksonen & Enscore

LACKSONEN & ENSCORE (1993) beschreiben in Anlehnung an KOOPMANS & BECKMANN (1957) ein quadratisches Zuordnungsverfahren für das dynamische Layoutproblem (DFLP). Unter Berücksichtigung zukünftiger Produktionsentwicklungen sowie der entstehenden Rekonfigurationskosten wird das klassische Zuordnungsproblem auf mehrere Perioden ausgedehnt. Dementsprechend steigt auch die Komplexität des zu lösenden Problems. Die Maschinen werden als gleich groß und ohne Orientierung angenommen.

Bei diesem Verfahren wird in mehreren aufeinander folgenden Planungsperioden jedem freien Standort der gerasterten Fabrikfläche eine Maschine mit dem Ziel zugeordnet, die gesamten Materialflusskosten zwischen den Zellen zu minimieren. Bei diesen Kosten werden auch die Rekonfigurationskosten (z.B. Planungskosten, Ausfallkosten, Verlagerungskosten etc.) in die Betrachtung einbezogen.

Die von LACKSONEN & ENSCORE verwendete iterative Heuristik wurde von BURKARD & BONNIGER (1983) in Kombination mit einer Vertauschungsroutine erstmals zur Lösung eines quadratischen Zuordnungsproblems implementiert. Der Algorithmus beginnt mit einer zufällig generierten Lösung (Zuordnung der Maschinen zu Rasterflächen). In jedem darauf folgenden Durchlauf der Iterationsschleife wird eine neue Lösung generiert und die bis dahin beste Lösung lokalisiert. Anschließend wird der Lösungsraum kontinuierlich durch schrittweises Abschneiden von Teillösungen der untersuchten Lösungsmenge verkleinert (*cutting planes*-Algorithmus). Damit bei diesem Schnitt nicht die global beste Lö-

sung eliminiert wird, endet jede Iteration mit einem Vertauschungsalgorithmus, der die Maschinen paarweise vertauscht (Abbildung 7).

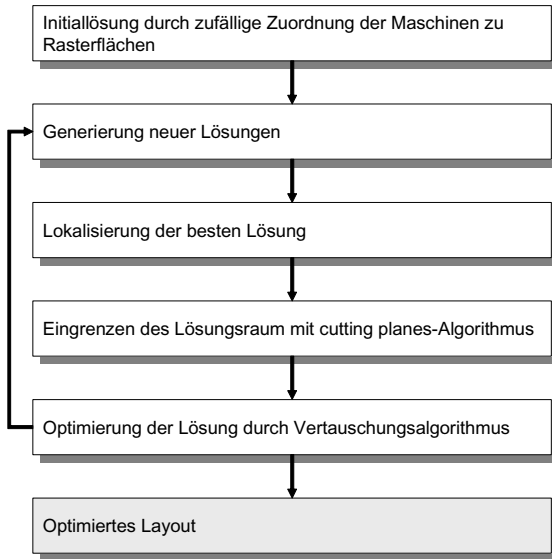


Abbildung 7: Lösungsverfahren nach LACKSONEN & ENSCORE (1993)

3.2.2.3 Das Verfahren von Bogatzki

BOGATZKI (1998) formuliert ein Zuordnungsverfahren für das Layoutproblem auf der Basis eines erweiterten *simulated annealing*-Algorithmus. Dieser Algorithmus wurde zur Erklärung physikalischer Sachverhalte von METROPOLIS et al. (1953) entwickelt. Die Anordnung der Atome in einem physikalischen System ist mit der Aufstellung der Maschinen in einer gerasterten Grundfläche vergleichbar. Der Energiezustand des physikalischen Systems entspricht dem Zielwert bei der Layoutbewertung.

WILHELM & WARD (1987) übertrugen diesen Ansatz auf ein quadratisches Zuordnungsproblem für die Layoutplanung. Ausgehend von einem zufällig generierten Initiallayout werden zwei Objekteinheiten stochastisch ausgewählt und vertauscht. Die quantitativ erfassbare Zielwertänderung dient als Maßstab, ob die Vertauschung akzeptiert wird. Verschlechterungen des Zielwerts sind möglich, solange eine definierte Grenze nicht unterschritten wird. Die Grenze nimmt im

Verlauf der Iterationen einen immer kleineren Wert an, bis eine festgelegte Anzahl von Iterationen erreicht wird (Abbildung 8).

Bei der von BOGATZKI (1998, S. 249-252) vorgeschlagenen *average-accepting-procedure* wird die Grenze über die Anzahl der mit einzubeziehenden Zielwerte bestimmt. Eine Vertauschung zweier Objekteinheiten wird akzeptiert, wenn der resultierende Zielwert besser als der Durchschnitt zu berücksichtigender Zielwerte ist. Durch den Ersatz des ältesten mit dem aktuellen Zielwert wird gleichzeitig eine fortlaufende Verkürzung des Grenzintervalls erreicht.

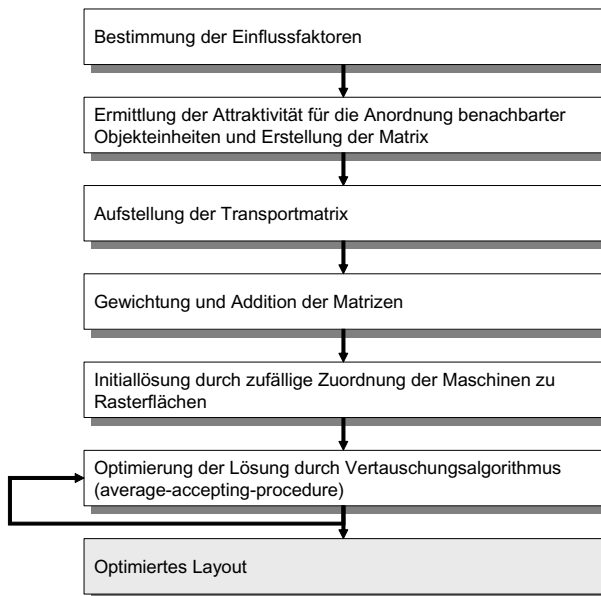


Abbildung 8: Lösungsverfahren nach BOGATZKI (1998)

Eine Besonderheit ist die Bewertung der Layoutvarianten über eine erweiterte Zielfunktion. Dieses von SHANG (1993) entwickelte Verfahren berücksichtigt sowohl quantitative als auch qualitative Faktoren, die einen Einfluss auf die Positionierung von Objekteinheiten, d.h. von Maschinen in einem Fabriklayout, haben. Die quantitativen Aspekte ergeben sich aus der Matrix der Transportintensitäten. Qualitative Einflüsse bei der Positionierung zweier Objekteinheiten, wie z.B. Temperaturentwicklung, Sicherheitsrichtlinien etc., werden durch den Planer bewertet bzw. gewichtet und in eine ähnliche Matrix überführt. Die beiden Mat-

rizen werden zu einer Gesamtmatrix aufaddiert, die als Maßstab zur Bewertung der Layoutalternativen dient.

3.2.2.4 Das Verfahren von Solimanpur, Vrat & Shankar

Auch SOLIMANPUR et al. (2004) formulieren zur Lösung des Layoutproblems ein quadratisches Zuordnungsverfahren. Von den Autoren wird ein *ant colony optimisation*-Algorithmus (*ACO*) vorgeschlagen, wie er bereits von MANIEZZO & COLORNI (1999) für ein quadratisches Zuordnungsproblem angewendet wurde.

Bei diesem Algorithmus handelt es sich um eine populationsbasierte Optimierungsmethode. Inspiriert wurde diese Methode von dem Verhalten der Ameisen bei der Futtersuche. Diese markieren ihren Weg zwischen Nest und Futterstelle mit Pheromonen. Diese Pheromonspur ermöglicht den nachfolgenden Artgenossen, den Weg zum Futter zu finden. Dabei wählen die Ameisen mit einer größeren Wahrscheinlichkeit den Weg, der mehr Pheromonspuren aufweist. So ist in der Natur zu beobachten, dass nach einiger Zeit die Ameisen den kürzesten Weg zum Futter gefunden haben (DORIGO et al. 1996).

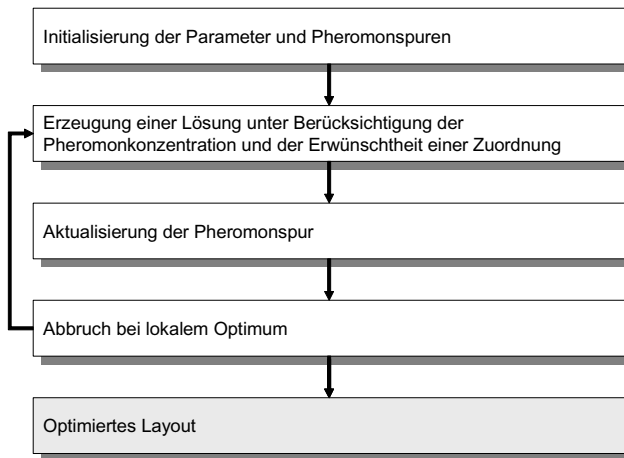


Abbildung 9: Lösungsverfahren nach SOLIMANPUR et al. (2004)

Diese Vorgehensweise wird auf ein mathematisches System übertragen. Zur Generierung einer Lösung beginnt eine virtuelle Ameise den Standorten der gerasterten Grundfläche Maschinen zuzuweisen, bis eine vollständige Zuweisung erfolgt ist. Im Gegensatz zu realen Ameisen können diese virtuellen Ameisen

heuristische Informationen in Form der Erwünschtheit einer Zuordnung berücksichtigen. Die Erwünschtheit bezieht sich dabei auf den Beitrag jeder Zuordnung zum Wert der Zielfunktion. Äquivalent zu realen Ameisen hinterlassen ihre virtuellen Vertreter bei jeder Zuordnung eine Pheromonspur. Die Auswahl einer neuen Zuordnung wird von der Pheromonkonzentration und der Erwünschtheit einer Zuordnung beeinflusst (Abbildung 9).

3.2.2.5 Das Verfahren von Chiang

Bei dem Verfahren von CHIANG (2001) handelt es sich um eine Weiterentwicklung des quadratischen Zuordnungsproblems. Hierbei sind die Maschinen im Vergleich zu den bisherigen Ansätzen frei auf der Fabrikgrundfläche beweglich. Die Maschinen haben eine vorgegebene rechteckige Form sowie eine wählbare Orientierung (horizontal/vertikal). Ausgehend von einem Initiallayout wird mit einer metaheuristischen Methode, dem *tabu search*-Algorithmus, die bestehende Lösung optimiert.

Bei heuristischen Verfahren besteht die Gefahr, dass die Suche in einem lokalen Optimum stagniert. Zur Überwindung dieser Problematik dienen allgemeine Strategien, die man als Metaheuristiken bezeichnet. Das metaheuristische Verbesserungsverfahren *tabu search* wurde zur Lösung von kombinatorischen Optimierungsproblemen von GLOVER (1996) entwickelt. Es erlaubt neben verbessernden Zwischenlösungen temporär auch verschlechternde Zwischenlösungen. Dabei muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Suche nicht immer wieder dieselbe Folge von Lösungen erzeugt. Bei dem *tabu search*-Algorithmus wird dies durch zeitweiliges Verboten (*tabu* setzen) von Lösungen verhindert.

CHIANG vereinfacht die Anordnung von Maschinen, indem er vier mögliche Nachbarschaftsbeziehungen vorgibt: zentrierte Nachbarschaft, benachbarte Ecken, Goldener-Schnitt-Nachbarschaft und Fibonacci-Nachbarschaft. Dies führt im Wesentlichen zu einem quadratischen Zuordnungsproblem. Insgesamt sind somit 68 Anordnungen einer Maschine zu einer anderen möglich.

Neben der üblichen Vertauschungsroutine kann bei CHIANG auch die nachbarschaftliche Position einer Maschine verändert werden. Der Algorithmus beginnt bei einer Initiallösung des Problems. Jeder darauf folgende Iterationszyklus berechnet die Zielwerte einer Reihe von möglichen Austausch- oder Bewegungsvorgängen. Der Algorithmus wird so lange fortgesetzt, bis sich keine Verbesserung mehr feststellen lässt oder der Planer abbricht (Abbildung 10).

Im Gegensatz zum herkömmlichen tabu search-Verfahren lässt CHIANG hier keine den Zielwert verschlechternden Lösungen zu. Alternativ implementiert er eine Benutzerschnittstelle, mit der der Planer jederzeit in den Optimierungsprozess eingreifen kann. Gleichzeitig wird versucht, das Lösungsergebnis durch mehrfaches Durchlaufen des Algorithmus mit unterschiedlichen Ausgangslösungen zu verbessern.

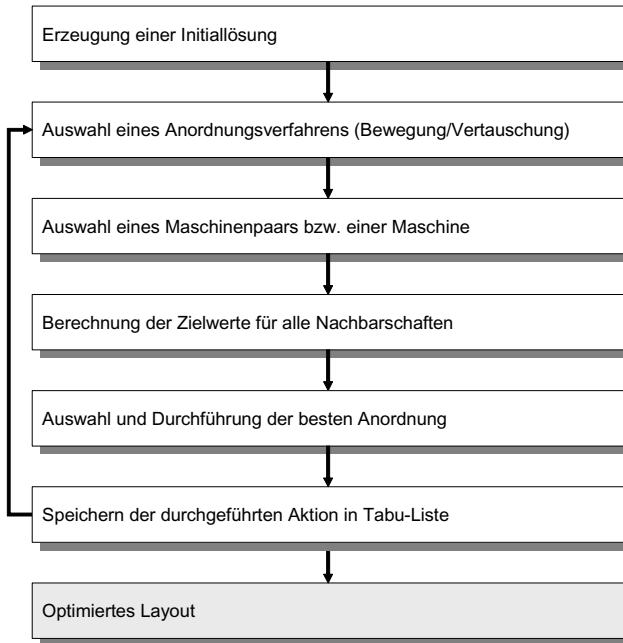


Abbildung 10: Lösungsverfahren nach CHIANG (2001)

3.2.2.6 Das Verfahren von Lacksonen

Dieses zweistufige Verfahren kombiniert ein quadratisches Zuordnungsproblem mit einem gemischt-ganzzahligen Programm, welches mit einem *branch&bound*-Algorithmus gelöst wird (LACKSONEN 1997).

Branch&bound-Verfahren werden zur Lösung von kombinatorischen und ganzzahligen Optimierungsmodellen eingesetzt und machen sich das Prinzip der impliziten Enumeration zunutze, d.h. es wird versucht, sukzessive Teilmengen des

Lösungsbereichs auszuschließen, in denen keine optimale Lösung des Problems liegt (DOMSCHKE & DREXL 2002, S. 116). Vom Namen der Methode bezieht sich ‚branch‘ auf das Verzweigen des Suchbaumes, wodurch man neue Teilmengen generiert. ‚Bound‘ weist auf die Verwendung unterer und oberer Schranken für den Wert der Zielfunktion hin, mit deren Hilfe man verschlechternde Teilmengen eliminieren kann. Das Verfahren endet, wenn alle Teilprobleme ausgeschlossen sind.

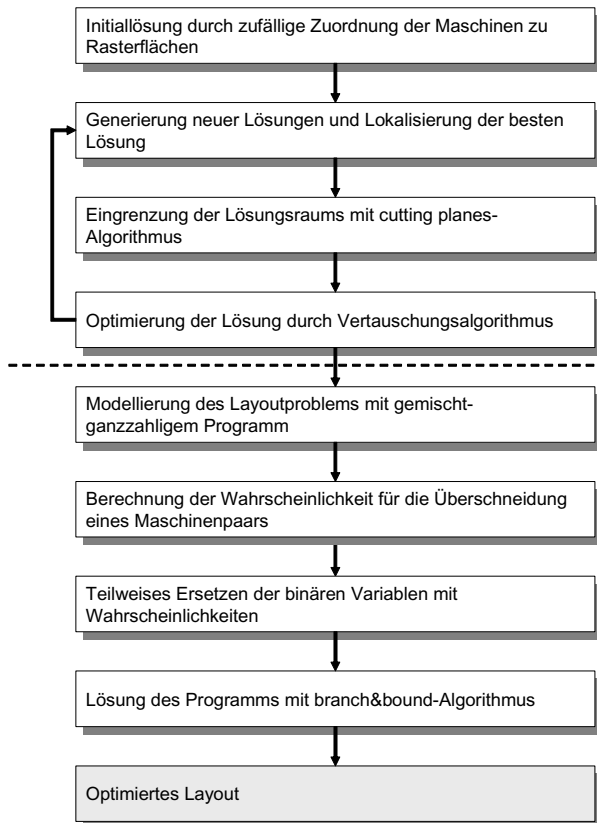


Abbildung 11: Lösungsverfahren nach LACKSONEN (1997)

Da ein gemischt-ganzzahliges Programm nur für eine kleine Anzahl an Objekten gelöst werden kann, schlägt der Autor ein Verfahren vor, welches im Vorfeld

einige der binären Variablen festlegt und somit das Problem verkleinert und lösbar macht.

In der ersten Stufe wird das Layoutproblem als ein quadratisches Zuordnungsproblem modelliert und mit einem *cutting planes*-Algorithmus gelöst (vgl. Abschnitt 3.2.2.2). Das Layout dient als Grundlage für das weitere Vorgehen in Stufe zwei. Die zweite Stufe modelliert das Layoutproblem in Anlehnung an MONTREUIL (1990) mit einem gemischt-ganzzahligen Programm. Um die Gesamtkomplexität zu reduzieren, werden einige der binären Variablen festgelegt. In Versuchen wurden dafür Schlüsselfaktoren identifiziert, mit deren Hilfe sich die Wahrscheinlichkeit für die überschneidungsfreie Anordnung von Maschinen ermitteln lässt. Auf der Basis dieses Wertes werden 80 % der ganzzahligen Variablen ersetzt. Die restlichen 20 % der Variablen werden im gemischt-ganzzahligen Programm mit einem branch&bound-Algorithmus exakt gelöst (Abbildung 11). Da die Koeffizienten auf den Ergebnissen der Versuche basieren, ist eine Übertragbarkeit auf neue Problemstellungen kritisch zu überprüfen.

3.2.2.7 Das Verfahren von Kim & Kim

Das von KIM & KIM (2000) entwickelte Verfahren basiert auf einem zweiphasigen heuristischen Algorithmus. Eine Besonderheit bei diesem Ansatz ist, dass sowohl Materialein- und ausgänge als auch die Orientierung (in 90°-Schritten) berücksichtigt werden.

In der ersten Phase (Konstruktionsphase) wird mit Hilfe eines wahrscheinlichkeitsgesteuerten Auswahlalgorithmus eine Reihenfolge der Maschinen für die Zuordnung erzeugt. Die Auswahlwahrscheinlichkeit steigt mit zunehmender Materialflussintensität von und zu der Maschine, da auf diese Weise ein größerer Effekt auf den zu optimierenden Zielwert zu erwarten ist. Anschließend werden die Maschinen ihrer Reihenfolge entsprechend mit einem gemischt-ganzzahligen Modell angeordnet. Aufgrund der sequentiellen Zuordnung reduziert sich die Problemkomplexität in erheblichem Maße und erlaubt damit höhere Rechengeschwindigkeiten. Um die Lösungsqualität zu verbessern, werden auf diese Art mehrere Initiallayouts generiert und das beste davon für das weitere Vorgehen ausgewählt.

In der zweiten Phase (Verbesserungsphase) nutzt der Algorithmus vier Verfahren zur Verbesserung des Layouts. Beim Positionstausch werden die relativen Positionen zweier Maschinen zueinander so lange verändert, bis keine Verbesserung

mehr festzustellen ist. Die Bereichsoptimierung sucht die kleinsten Bereiche, die drei oder vier Maschinen zusammenfassen. Innerhalb dieses Bereichs wird daraufhin die Position und Orientierung der Maschinen optimiert. Im nächsten Schritt erfolgt die Orientierungs- und Positionsanpassung einer Maschine, wobei die relative Position und Orientierung der übrigen Maschinen unverändert bleibt. Zum Abschluss wird die Orientierung aller Maschinen angepasst, ohne die relative Position zu verändern (Abbildung 12).

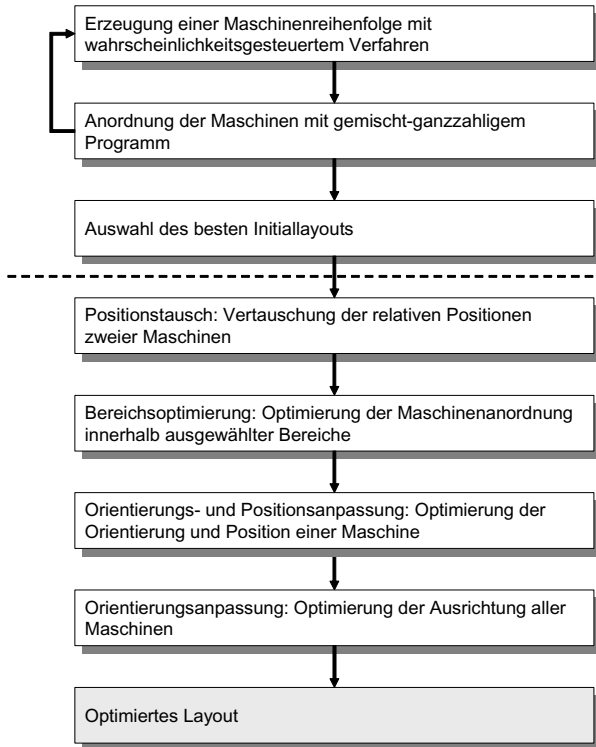


Abbildung 12: Lösungsverfahren nach KIM & KIM (2000)

3.2.2.8 Das Verfahren von Dunker, Radons & Westkämper

Dieses Verfahren basiert ebenfalls auf einem gemischt-ganzzahligen Programm, unterscheidet sich aber von LACKSONEN (1997) und KIM & KIM (2000) bei der

3 Stand der Erkenntnisse

Lösung durch die Verwendung eines genetischen Algorithmus (DUNKER et al. 2003).

Genetische Algorithmen sind stochastische Verbesserungsverfahren, die den Lösungsraum simultan an mehreren Stellen untersuchen. Ein genetischer Algorithmus basiert, analog zur biologischen Evolution, auf Populationen von Individuen (Mengen zulässiger Lösungen), die im Zeitablauf, d.h. in mehreren Iterationen, ihre Erbinformation verändern. Analog zur Kodierung der biologischen Erbanlagen in Chromosomen, die aus einer Kette von Genen bestehen, müssen Individuen in geeigneter Form kodiert werden, so dass Operationen wie Mutation, Selektion oder Kreuzung auch an Lösungen vorgenommen werden können, um neue Lösungen zu generieren. Die Vitalität (Lebensfähigkeit) eines Individuums in einer bestimmten Umwelt wird als Fitness bezeichnet. Sie ist ein Maß für die Qualität einer kodierten Lösung und entspricht in der Regel einem Zielfunktionswert (DOMSCHKE & DREXL 2002, S. 120 f.).

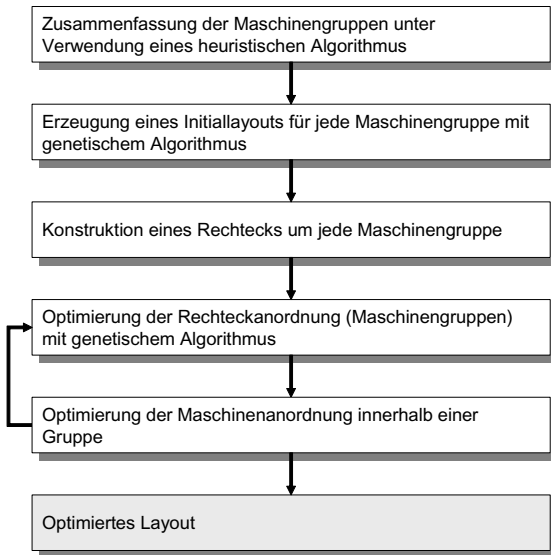


Abbildung 13: Lösungsverfahren nach DUNKER et al. (2003)

Der hier vorgestellte Algorithmus beginnt mit der Bildung von Maschinengruppen. Dabei werden diese Maschinengruppen so ausgewählt, dass sich die Materialflüsse bzw. die Materialflusskosten zwischen den Gruppen minimieren.

DUNKER et al. verwenden dazu einen heuristischen Gruppenbildungsalgorithmus, wie er bei HARHALAKIS et al. (1990) oder TAM & LI (1991) beschrieben wird.

Zunächst wird unter Verwendung eines genetischen Algorithmus ein Initiallayout erzeugt, wobei um jede Gruppe ein Rechteck konstruiert wird. Diese Rechtecke, d.h. Maschinengruppen, werden in einem zweiten genetischen Algorithmus optimal zueinander angeordnet. Verschachtelt in diesen Algorithmus optimiert ein weiterer genetischer Algorithmus die Anordnung der Maschinen innerhalb jeder Gruppe, bis keine nennenswerte Zielwertverbesserung mehr eintritt (Abbildung 13).

3.2.2.9 Das Verfahren von Garces-Perez, Schoenefeld & Wainwright

Im Verfahren von GARCÉS-PÉREZ et al. (1996) wird das Layout im Gegensatz zu den bisherigen Ansätzen mit der *slicing tree structure*, einer auf OTTEN (1982) zurückgehenden Graphendarstellung, abgebildet. Darunter versteht man eine Baumstruktur, die aus zwei Arten von Knoten besteht. Der Elementknoten symbolisiert ein Objekt (eine Maschine) und wird mit dem Maschinenindex (0, 1, 2, ..., n-1) gekennzeichnet. Der Verknüpfungsknoten (U = up, D = down, L = left, R = right) beschreibt den Zusammenhang zwischen den untergeordneten Elementknoten. Ist beispielsweise der Verknüpfungsknoten D, wird die Maschine, die durch den linken Elementknoten gekennzeichnet ist, unterhalb (down) der Maschine, dargestellt durch den rechten Elementknoten, angeordnet. Eine Problematik bei der Konstruktion der Lösungen ist die mögliche Redundanz (Abbildung 14).

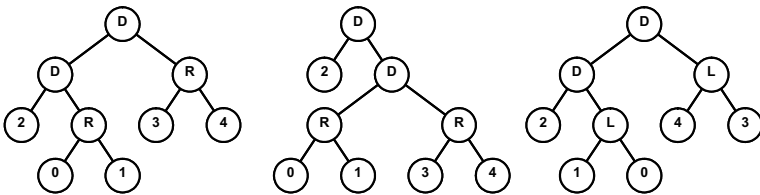


Abbildung 14: Beispiele von *slicing tree structures* für das gleiche Layout

Zur Überführung der *slicing tree structure* in ein optimiertes Layout wird das *genetic programming* verwendet, eine Erweiterung des genetischen Algorithmus. Hierbei werden die Individuen nicht als Chromosom, d.h. als binärer Vektor, dargestellt, sondern als Ausdrucksbäume (Programme). Der Algorithmus kombiniert die Verknüpfungsknoten und die Elementknoten zu einer Lösung. Die Ver-

3 Stand der Erkenntnisse

besserungsoperationen sind identisch zu denen des genetischen Algorithmus. Das Verfahren beginnt bei einem zufällig generierten Ausdrucksbaum und wird durch den gemessenen Fitnesswert der Zielfunktion zu einem optimalen Layout geleitet.

Die Baumstruktur wird von GARCES-PEREZ et al. mit Hilfe eines *top-down-bottom-up*-Verfahrens in ein reales Layout übersetzt. Zunächst wird nach dem *top-down*-Verfahren ein Initiallayout eingeteilt, das zwar dem Flächenbedarf entspricht, die Seitenverhältnisse jedoch nicht berücksichtigt. Durch Umformungen wird die Grundfläche soweit vergrößert, dass sich die Maschinen ohne Überschneidungen anordnen lassen. Die entstandenen Freiflächen werden daraufhin mit einem *bottom-up-Verfahren* reduziert, indem die Maschinen zusammengedrückt werden (Abbildung 15).

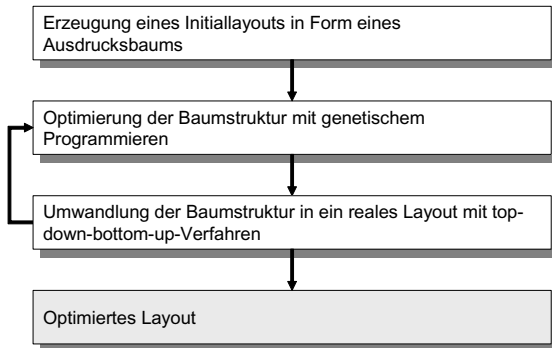


Abbildung 15: Lösungsverfahren nach GARCES-PEREZ et al. (1996)

3.2.2.10 Zusammenfassende Bewertung

Im Folgenden werden die vorgestellten Verfahren im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit bei der Layoutplanung bewertet. Die ausgewählten Beurteilungskriterien richten sich dabei hauptsächlich an die realitätsnahe Abbildung der Fabrik sowie der Betriebsmittel und somit an die praktische Umsetzbarkeit des Layouts.

Unter einer kontinuierlichen Fabrikfläche wird eine nicht gerasterte Fläche verstanden, auf der Maschinen frei positionierbar sind. Allgemeine quadratische Zuordnungsprobleme, wie sie von LACKSONEN & ENSCORE und SOLIMANPUR et al. formuliert werden, verwenden ausschließlich die Zuordnung zu vorgegebenen

Maschinenplätzen. Aufgrund unterschiedlicher Maschinengrößen entstehen so Freiflächen, die nachträglich eliminiert werden müssen. Auch BOGATZKI formuliert ein quadratisches Zuordnungsproblem, hebt aber im Nachhinein das Flächenraster auf, um die Maschinen zusammen zu schieben. Da GARCES-PEREZ et al. von einer Anordnung der Maschinen an ihren geometrischen Mittelpunkten ausgehen, ist dieses Verfahren ebenfalls eingeschränkt. Die von CHIANG aufgestellten umfangreichen Nachbarschaftsbeziehungen ermöglichen eine vergleichbar flexible Maschinenaufstellung wie die Verfahren von LACKSONEN, KIM & KIM oder DUNKER et al., die bereits zu Beginn eine kontinuierliche Fabrikfläche voraussetzen.

Innerhalb der Fabrikfläche müssen Bereiche ausweisbar sein, die nicht belegt werden dürfen (z.B. Säulen, Sperrflächen). Dieser Sachverhalt ist bei allen quadratischen Zuordnungsproblemen implementierbar, indem einzelne Rasterflächen gesperrt werden. Allerdings erschwert sich dadurch bei BOGATZKI die Komprimierung des Layouts. Gemischt-ganzzahlige Modelle können Sperrflächen durch weitere Restriktionen ausweisen. Nicht realisierbar ist dies bei GARCES-PEREZ et al., da bei der Übertragung der Graphendarstellung in ein reales Layout keine Restriktionen vorgesehen werden. Explizit sind Sperrflächen bei keinem Verfahren vorgesehen.

Ähnlich verhält es sich bei den Verkehrswegen, die prinzipiell als Sperrflächen behandelt werden können. Allerdings wirkt sich die Berücksichtigung von Verkehrswegen auf die Materialflüsse und damit auf die Zielfunktion aus. Am ehesten lässt sich diese Anforderung bei DUNKER et al. durch nachträgliches Einfügen von Verkehrswegen zwischen den Maschinengruppen erfüllen, da aufgrund der minimierten Materialflussbeziehungen kaum Auswirkungen auf die Zielfunktion zu erwarten sind. Dies setzt allerdings voraus, dass Verkehrswege frei festgelegt werden können, was in der Praxis (z.B. aufgrund von Brandschutzbestimmungen) häufig nicht der Fall ist. Allgemein gilt auch hier, dass Verkehrswege von keinem der beschriebenen Verfahren berücksichtigt werden.

Mit Ausnahme des Verfahrens von LACKSONEN & ENSCORE lassen alle Ansätze unterschiedliche Maschinengrößen zu. Die zusätzlich zur Maschinenaufstandsfläche erforderlichen Logistik- und Bedienerflächen lassen sich daher bereits im Vorfeld der als Rechteck approximierten Maschinenfläche hinzurechnen. Bei LACKSONEN und CHIANG können darüber hinaus Maschinen horizontal und vertikal ausgerichtet werden. KIM & KIM und DUNKER et al. ermöglichen sogar eine

3 Stand der Erkenntnisse

Orientierung in 90°-Schritten. Zudem sehen beide Verfahren Materialein- und -ausgänge vor und können dadurch den Materialfluss detaillierter abbilden.

Bestimmte Maschineneigenschaften oder Prozessmerkmale können die relative Anordnung von Betriebsmitteln qualitativ beeinflussen. Beispielsweise ist die benachbarte Anordnung einer Lackieranlage neben einer Sandstrahlanlage zu vermeiden. BOGATZKI löst diese Problematik mit einer modifizierten Zielfunktion, in der neben den Materialflusskosten auch subjektive Faktoren bei der Bewertung einbezogen werden. DUNKER et al. bilden die Eignung nachbarschaftlicher Anordnungen durch eine Gewichtung des Materialflusses ab.

Bei bestimmten Voraussetzungen (z.B. Anforderung an Fundamentierung) kann eine Maschinenverlagerung unter Umständen von vorneherein ausgeschlossen werden. Die Immobilität einer Anlage wird bei quadratischen Zuordnungsproblemen durch die Zuordnung der entsprechenden Rasterfläche im Vorfeld berücksichtigt. CHIANG, LACKSONEN und DUNKER et al. führen hierzu eine eigene Variable ein, während KIM & KIM und GARCES-PEREZ et al. keine immobilen Anlagen vorsehen.

	Lacksonen & Enscore	Bogatzki	Solimanpur et al.	Chiang	Lacksonen	Kim & Kim	Dunker et al.	Garces-Perez et al.
Kontinuierliche Fabrikfläche	○	●	○	●	●	●	●	●
Sperrflächen	●	●	●	●	●	●	●	○
Verkehrswege	○	○	○	○	○	○	○	○
Unterschiedliche Maschinengröße	○	●	●	●	●	●	●	●
Orientierung	○	○	○	●	●	●	●	○
Materialein-/ausgänge	○	○	○	○	○	●	●	○
Nachbarschaftsrestriktionen	○	●	○	○	○	○	●	○
Immobilität	●	●	●	●	●	○	●	○

● erfüllt ● teilweise erfüllt ○ nicht erfüllt

Tabelle 1: Zusammenfassende Bewertung der Layoutplanungsverfahren

Tabelle 1 fasst die Bewertung der untersuchten Layoutplanungsverfahren noch einmal zusammen. Insgesamt bleibt festzuhalten, dass eine realitätsnahe Planung von Layoutalternativen noch nicht hinreichend ermöglicht wurde. Hier ist besonders die fehlende Berücksichtigung von Verkehrswegen hervorzuheben. Die notwendigen Anpassungen der so geplanten Ideallayouts können zum Teil zu erheblichen Abweichungen vom erwarteten Wert der Zielfunktion führen.

3.3 Bewertungsorientierte Ansätze

Der steigende Automatisierungs- und Integrationsgrad bei Fertigungsprozessen führt zu einer Veränderung der Kostenstruktur innerhalb der Produktion in Richtung der Fixkosten (WILDEMANN 1990, S. 58; SIEGWART & RAAS 1991, S. 42; KALUZA 1994, S. 395). Im Hinblick auf die schwankenden Marktbedarfe und die daraus resultierende Notwendigkeit zur kurzfristigen Anpassung der Produktionskapazitäten muss die Kostenrechnung dieser Problematik methodisch adäquat begegnen und entscheidungsrelevante Informationen liefern. SCHWEITZER & FRIEDL (1994, S. 70) fassen die Aufgabenstellung wie folgt zusammen: „Die fixen Kosten treten als Gestaltungsobjekt in den Vordergrund und die programmorientierten Kosteneinflussgrößen gewinnen als Gestaltungsparameter zunehmend an Bedeutung.“ Fixkosten entstehen durch die Bereitstellung von Potenzialfaktoren, d.h. von personellen und technologischen Kapazitäten (RIEBEL 1994, S. 387). Die Begriffe Fixkosten und Kapazitätskosten können daher synonym verwendet werden (MAYER 1998, S. 2).

Konventionelle Kostenrechnungsverfahren konzentrieren sich auf die Messung und Bewertung der Kosten, die während des Produzierens entstehen. Dabei wird die Vollausslastung der Maschinen bei gleichzeitiger Produktion einwandfreier Güter vorausgesetzt. Die Kosten, die durch ‚Nicht-Produktion‘ verursacht werden, bleiben häufig unbeachtet. Vielmehr müssen die Kosten für eine gegebene Zeitspanne als feststehend angenommen werden. So stellt auch DRUCKER (1991, S. 12) fest, dass „einzig variabel und zugleich beeinflussbar ... die Zeit (ist), die ein gegebener Ablauf beansprucht.“ Neue Kostenrechnungsverfahren müssen sich demnach stärker an der Nutzung der bereitgestellten Potenzialfaktoren orientieren.

3.3.1 Modelle der Kosten- und Leistungsrechnung

Als Teil eines Management-Informationssystems kommt der Kostenrechnung die Aufgabe zu, Informationen für Entscheidungen bereitzustellen. Entsprechend den Phasen des Entscheidungsprozesses lassen sich folgende Kostenrechnungsaufgaben differenzieren (REICHMANN 1997, S. 119):

- **Darstellungs- und Ermittlungsfunktion:**
Die differenzierte Darstellung des betrieblichen Mitteleinsatzes liefert den jeweiligen Entscheidungsträgern Anregungsinformationen, um potenzielle Handlungsbedarfe zu identifizieren.
- **Planungs- und Prognosefunktion:**
Die Angabe der Abhängigkeiten von Kostenhöhe und Kosteneinflussgrößen informiert über die kostenmäßigen Auswirkungen von Handlungsalternativen.
- **Vorgabefunktion:**
Nach Auswahl einer bestimmten Entscheidungsalternative sind die prognostizierten Kostenkonsequenzen in entscheidungsträgerrelevante Vorgaben wie z.B. Budgetvorgaben umzusetzen.
- **Kontrollfunktion:**
Abweichungsanalysen zwischen Ist- und Sollwerten ermöglichen eine nachträgliche Entscheidungskontrolle.

Im Fokus dieser Arbeit steht die Planungs- und Prognosefunktion, da vornehmlich die finanziellen Konsequenzen von Strukturalternativen für Investitionsentscheidungen von Interesse sind. Somit kommt der Bestimmung entstehender Kosten in Abhängigkeit der Kosteneinflussgrößen eine besondere Bedeutung zu.

3.3.1.1 Vollkostenrechnung

Das System der *Vollkostenrechnung* erfasst alle in einer Periode entstandenen Kosten, die zur Weiterverrechnung in die Einzel- und die Gemeinkostenrechnung aufgeteilt werden. Während die Einzelkosten direkt auf die Kostenträger bezogen werden, erfolgt die Zuteilung der Gemeinkosten indirekt mit Hilfe von Verteilungsschlüsseln (HUMMEL & MÄNNEL 1986, S. 43; SCHWEITZER & KÜPPER 1998, S. 73).

Bei kostenrechnerischen Ansätzen stellt sich die Frage nach der Abgrenzung und Zurechnung der strukturelevanten, d.h. der durch die Produktionsstruktur direkt

beeinflussbaren Kosten. Daher ist in jedem Fall eine verursachungsgerechte Zuordnung der Kosten notwendig, weshalb die Vollkostenvergleiche grundsätzlich als Lösungsansatz ausscheiden. Durch die proportionale Zuordnung von Fix- und Gemeinkosten über eine Gemeinkostenschlüsselung auf die Kostenträger ist eine Kostenverteilung nach dem Verursachungsprinzip nicht in voller Konsequenz zu verwirklichen. Eine solchermaßen verfälschte Kostenstruktur kann keine sachdienlichen Planungsinformationen für Entscheidungsgremien liefern (HEINEN & DIETL 1991, S. 984-987; SCHWEITZER & KÜPPER 1991, S. 296-301; RIEBEL 1994, S. 596).

Darüber hinaus widersprechen die Abbildungsziele der Kostenrechnungsverfahren auf Vollkostenbasis der Forderung nach der „Abbildung der mengenmäßigen und zeitlichen Disponierbarkeit von Fixkosten“ (MÄNNEL 1993, S. 71). Der betriebliche Güter- und Leistungsverzehr wird lediglich innerhalb gegebener Potenzialfaktorstrukturen und -kapazitäten erfasst (FRANZ 1992, S. 1492; SCHWEITZER & KÜPPER 1998, S. 442 f.). Veränderbare Kapazitäten müssen im Rahmen von Investitionsrechnungen in einer mehrperiodischen Betrachtungsweise abgebildet werden (KÜPPER 1994, S. 67).

3.3.1.2 Teilkostenorientierte Ansätze

Zur Vermeidung der Fixkostenproportionalisierung, die bei der Verwendung der Vollkostenrechnung entsteht, wurden *Teilkostenrechnungssysteme* entwickelt, deren systembildendes Kriterium die Trennung der Kosten entweder in Einzel- und Gemeinkosten oder in fixe und variable Bestandteile ist. Um die betrieblichen Aufträge und Erzeugnisse ausschließlich mit den verursachungsgerechten proportionalen Kosten zu belasten, wurde die flexible Plankostenrechnung im Wesentlichen von PLAUT (1976, 1984a, 1984b) zur *Grenzplankostenrechnung* weiterentwickelt.

Die Grenzplankostenrechnung ist eine Teilkostenrechnung, da lediglich der proportionale Teil der entstehenden Kosten auf die Kostenträgereinheit verrechnet wird. Dadurch lassen sich zwei wesentliche Kostenbestimmungsfaktoren unterscheiden. Zum einen bildet die Kapazität oder die Betriebsbereitschaft die entscheidende Größe für das Fixkostenvolumen eines Unternehmens. Zum anderen determiniert die Beschäftigung den proportionalen Anteil der Gesamtkosten. Im Gegensatz zur *flexiblen Plankostenrechnung* wird bei der Grenzplankostenrechnung die auf der Kostenstelle vorgenommene Einteilung der Kosten in fixe und variable Bestandteile auch bei der Bildung von Verrechnungssätzen für innerbe-

triebliche Leistungen sowie von Kalkulationssätzen für die Hauptkostenstellen bis zur Kostenträgerstückrechnung beibehalten. Die in der Folge nicht mehr in die Verrechnungs-, Kalkulations- und prozentualen Zuschlagssätze eingehenden Kostenstellenfixkosten werden in der Regel monatlich als Periodenkosten in die kurzfristige Erfolgsrechnung übernommen (KILGER 1993, S. 59 ff.).

Ein verbreitetes Kostenrechnungssystem auf Teilkostenbasis ist das *Direct Costing*, dessen Hauptmerkmal die strikte Trennung von (beschäftigungs-)variablen (engl: direct costs) und (beschäftigungs-)fixen Kosten ist. Im Gegensatz zum Direct Costing ist die Grenzplankostenrechnung wesentlich differenzierter. Während beim Direct Costing lediglich die hergestellten Erzeugnismengen als beschäftigungsrelevante Bezugsgröße dienen, stellt die kostenstellenbezogene Kostenplanung der Grenzplankostenrechnung einen wesentlich verfeinerten Ansatz im Hinblick auf die Bezugsgrößenauswahl dar (REICHMANN 1997, S. 121 ff; MAYER 1998, S. 26). Im Folgenden wird zur Beurteilung der Teilkostenrechnungssysteme von der Grenzplankostenrechnung als dem am weitesten entwickelten Ansatz ausgegangen.

3.3.1.3 Modelle mit differenzierter Fixkostenbetrachtung

Das Konstrukt der Grenzplankostenrechnung, das alle unterjährig disponierbaren Kosten als proportional und alle Kosten mit darüber hinaus gehendem Zeithorizont undifferenziert als fix klassifiziert, hat zu Weiterentwicklungen der Grenzplankostenrechnung geführt (Abbildung 16).

So schlägt KILGER eine Differenzierung der Fristigkeiten bei der Kostenplanung in Form der *Dynamischen Grenzplankostenrechnung* vor. „Je nachdem, ob man einen längeren oder kürzeren Anpassungsspielraum festlegt, ist ein größerer oder geringerer Teil der Kosten den proportionalen Kosten zuzuordnen. Hierdurch wird zugleich die Höhe der entscheidungsrelevanten Erzeugnis-Grenzkosten beeinflusst“ (KILGER 1993, S. 97).

Bei der *Stufenweisen Fixkostendeckungsrechnung* nach AGHTE (1959) und MELLEROWICZ (1977, S. 171 ff.) wird im Gegensatz zur Dynamischen Grenzplankostenrechnung der Fixkostenblock aufgeschlüsselt und damit in Entscheidungsrechnungen einbezogen. Die proportionalen Kosten entsprechen denen der Grenzplankostenrechnung. Die fixen Kosten werden über verschiedene Deckungsbeitragsstufen schichtweise unter Vermeidung einer Schlüsselung Erzeugnis-, Erzeugnisgruppen-, Bereichs- und Unternehmensfixkosten zugeordnet.

Vollkostenorientierte Ansätze

- der gesamte Kostenblock des Unternehmens geht in die Kostensätze ein
- vollkostenorientierte Kostensätze werden als relevante Kosten angesehen

Vollkosten

Grenzplankostenrechnung

- nur die proportionalen Kosten (bezugsgrößenabhängig und unterjährig veränderbar) gehen in die relevanten Kosten ein
- Fixkosten bleiben wegen der Prämisse konstanter Kapazitäten vollkommen unberücksichtigt

Proportionale Kosten	Fixe Kosten
-------------------------	----------------

Dynamische Grenzplankostenrechnung

- unterjährig diff. Fristigkeitsgrade (z.B. Monat, 6 Monate) lassen bisherig proportional behandelte Kosten je Entscheidungshorizont fix werden
- Prämisse konstanter Kapazität bleibt erhalten, d.h. Fixkosten (überjährig) sind auch hier nicht relevant

Proportionale Kosten				Fixkosten > 1 Jahr
< 1 Monat	< 6 Monate	< 1 Jahr		

Stufenweise Fixkostendeckungsrechnung

- Prämisse unveränderter Kapazitäten wird aufgehoben
- relevante Kosten sind neben den proportionalen die den Entscheidungsebenen zuordenbaren Kosten

Proportionale Kosten	Unternehmensfixe Kosten
	Bereichsfixe Kosten
	Erzeugnisgruppenfixe Kosten
	Ergebnisfixe Kosten

Stufenweise Grenzkostenrechnung

- Prämisse unveränderter Kapazitäten wird aufgehoben
- Kriterium für die Segmentierung der Fixkosten ist allerdings deren zeitliche Veränderbarkeit

Proportionale Kosten (autom. Veränder- barkeit)	kurz- fristig abbau- bare Fix- kosten	mittel- fristig abbau- bare Fix- kosten	lang- fristig abbau- bare Fix- kosten
---	---	---	---

Fixkostenmanagementorientierte Plankostenrechnung

- Zusätzliche Aufteilung der zeitlich differenzierten Fixkostenschichten nach Beschäftigungsgraden (z.B. 70 %, 60 %, 0 %)

variable Kosten (autom. Veränder- barkeit)	Monat			Jahr			überjährig		
	70%	60%	0%	70%	60%	0%	70%	60%	0%

Abbildung 16: Differenzierte Fixkostenbetrachtung bei verschiedenen Kostenrechnungsverfahren (in Anlehnung an MAYER 1998, S. 24.f.)

3 Stand der Erkenntnisse

Die hierarchisch gruppierten Fixkosten entsprechen Bereitschaftskosten auf bestimmten Ebenen des Unternehmens.

Im Gegensatz zu AGHTE und MELLEROWICZ differenziert SEICHT (1963) mit seiner *Stufenweisen Grenzkostenrechnung* bei der Zuordenbarkeit von Fixkosten nach deren zeitlicher Veränderbarkeit in kurz-, mittel- und langfristig abbaubare Kosten. Er kommt zu dem Schluss, „dass eine Gliederung der gesamten fixen Periodenkosten in eine große Anzahl spezieller Fixkostenblöcke sowie die Durchführung einer ‚Stufenweisen Deckungsbeitragsrechnung‘ erst dann sinnvoll sein und zum logischen Abschluss gebracht werden können, wenn man die in den speziellen Fixkostenblöcken enthaltenen Kosten in abbaufähige und nicht abbaufähige unterteilt und nur die abbaufähigen (beeinflussbaren) Teile der speziellen Fixkosten in die entscheidungsorientierte ‚Stufenweise Fixkostendeckungsrechnung‘ eingehen lässt“ (SEICHT 1988, S. 48).

Die zeitliche Kostenkategorisierung SEICHTS wird von REICHMANN (1973) übernommen. Gleichzeitig ordnet REICHMANN in Anlehnung an AGHTE und MELLEROWICZ die Fixkosten zusätzlich Erzeugnissen und Erzeugnisgruppen bzw. auf Gesamtunternehmensebene zu. Dieser Gedanke wird von SCHOLL (1981; REICHMANN & SCHOLL 1984) zu einem geschlossenen Konzept der *Fixkostenmanagementorientierten Plankostenrechnung* weiterentwickelt. Dabei unterscheidet er zwischen automatisch mit der Kostenstellenbezugsgröße veränderlichen und monatlich, quartalsweise, halbjährlich und längerfristig veränderlichen Fixkosten. Der Ansatz soll anhand eines Zahlenbeispiels erläutert werden (Abbildung 17).

Kostenart	Kosten gesamt	Kosten variabel	Kosten fix														
			monatlich			Quartal			Halbjahr			längerfristig					
			70%	60%	0%	70%	60%	0%	70%	60%	0%	70%	60%	0%			
Löhne	80					10	20	40							10	20	40
Fertigungsenergie	30	30															
Maschinenleasing	60									30	60						
Summe	170	30				10	20	40		30	60	10	20	40			

Abbildung 17: Zahlenbeispiel für die Fixkostenmanagementorientierte Plankostenrechnung

Da Löhne nicht automatisch mit Beschäftigungsschwankungen veränderbar sind, zählen sie zu den Potentialfaktorkosten und wären in diesem Beispiel hälftig quartalsweise und hälftig längerfristig abbaubar. Innerhalb der Quartalsfrist ließen sich in diesem Fall bei einer Absenkung der Beschäftigung auf 70 % der Ka-

pazität 10 Einheiten, bei einer weiteren Reduktion auf 60 % bzw. 0 % der Kapazität 20 Einheiten bzw. 40 Einheiten einsparen.

3.3.1.4 Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung

Die von RIEBEL (1994) konzipierte *Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung* unterscheidet sich grundlegend von den bisher vorgestellten Kostenrechnungssystemen. Für RIEBEL (1983, S. 22) besteht die Hauptaufgabe der Kosten- und Leistungsrechnung in der „Vorbereitung von Entscheidungen“. Dafür muss sie sich „auf solche Rechengrößen beschränken, die ausschließlich durch die betrachtete Maßnahme ausgelöst werden“ (RIEBEL 1994, S. 600). Um Kosten und Leistungen den betrieblichen Entscheidungen, die sie verursacht haben, korrekt zurechnen zu können, beruht sein System auf dem Identitätsprinzip. Danach können Kosten und Erlöse „einander oder einem Bezugsobjekt nur dann logisch zwingend gegenübergestellt werden, wenn sie auf einen gemeinsamen dispositiven Ursprung, also einen identischen Entscheidungszusammenhang, zurückgehen“ (RIEBEL 1994, S. 627). Gleichzeitig orientiert sich RIEBEL am pagatorischen Kostenbegriff der Investitionsrechnung. Während sich pagatorische Rechnungen auf den Nominalgüterstrom beziehen und auf Zahlungen abstellen, bilden kalkulatorische Rechnungen den Realgüterstrom unabhängig von einer Zahlungsverknüpfung ab (MOEWS 1996, S. 1).

Dies erfordert eine Erweiterung des Einzelkostenbegriffs, der üblicherweise eng an die direkte Produktzurechenbarkeit geknüpft ist. Die Basis bildet eine kombiniert aufgebaute Grundrechnung, bei der es sich um eine universell auswertbare Zusammenstellung direkt erfasster Kosten handelt. Sie ist durch eine Hierarchie betrieblicher Bezugsobjekte charakterisiert, denen nur diejenigen Kosten angelastet werden, die alleine durch die Entscheidung über das betrachtete Bezugsobjekt ausgelöst werden. Als Bezugsobjekte kommen neben den Kostenträgern z.B. auch Kostenstellen, Kostenstellengruppen, Unternehmensbereiche, Vertriebswege und sogar Zeitintervalle in Frage und sind so je nach Unternehmen individuell gestaltbar. Alle Kosten sind innerhalb der Hierarchie betrieblicher Bezugsgrößen an der untersten Stelle auszuweisen, an der sie noch als Einzelkosten erfasst werden können. In diesem Fall spricht man von relativen Einzelkosten des Bezugsobjekts. Für alle darunter liegenden Hierarchieebenen stellen dieselben Beträge relative Gemeinkosten dar (RIEBEL 1994, S. 449 ff; COENENBERG 1999, S. 262 ff.).

3.3.1.5 Betriebsmodelle

Die auf LABMANN (1983) zurückgehenden *Betriebsmodelle* weichen stark von den traditionellen Verfahren der Plankostenrechnung ab. Das Konzept basiert auf der Erkenntnis, „dass stück- bzw. kostenträgerbezogene Erfolgsgrößen (Deckungsbeiträge) nur unter relativ einfachen Produktions- und Marktbedingungen für Planungs- und Kontrollrechnungen geeignet sind“ (LABMANN 1983, S. 91). Untersuchungsobjekt dieser Arbeit sind jedoch Produktionssysteme, die durch die art- und mengenmäßige Veränderlichkeit des Produktionsprogramms sowie den flexiblen Ressourceneinsatz charakterisiert sind, so dass Stückkosten oder kostenträgerbezogene Deckungsbeiträge immer Zufallswerte in Abhängigkeit der Ausprägung von Systemeinflussgrößen sein werden.

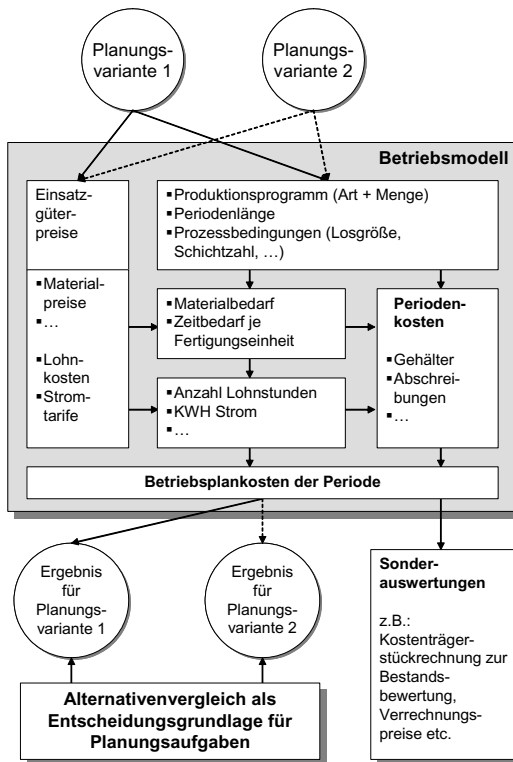


Abbildung 18: Konzept der Betriebsmodelle nach LABMANN (1983)

Zielsetzung muss daher die Optimierung des Periodennettoerfolgs eines Gesamtsystems sein. Dies kann nur über die vergleichende Bewertung der Gesamtergebnisse verschiedener Planungsvarianten geschehen, die sich durch Betriebsmodelle ermitteln lassen (Abbildung 18).

Im Gegensatz zur Beschreibung von Kostenabhängigkeiten auf der Basis von einer oder mehreren Kostenstellenbezugsgrößen wird ein System von Kostenbestimmungs- und Kosteneinflussgrößen aufgebaut (LABMANN 1968, S. 76 ff; LABMANN 1976, S. 51 ff.). Dabei erfolgt eine weitgehende Trennung zwischen Mengen- und Bewertungsrechnung, so dass Auswirkungen von Preisänderungen schnell identifiziert werden können. Die Ausgangsbasis für eine Planungsvariante bilden ein Produktionsprogramm nach Art und Menge, die Periodenlänge sowie die verschiedenen Prozessparameter (z.B. Lösgröße, Schichtzahl). Über ein System von Einflussgrößen werden in mehreren Rechenschritten die Betriebsplankosten der Periode für verschiedene Planungsvarianten ermittelt und in die Entscheidungsrechnung einbezogen. Trotz der periodenbezogenen Bestimmung lassen sich die Betriebsplankosten dennoch in der üblichen Kostenarten- und Kostenstellengliederung darstellen, um daraus sekundäre Sonderauswertungen wie z.B. hinsichtlich Produktstückkosten vorzunehmen.

3.3.1.6 Kapazitätskostenrechnung

MAYER (1998) versucht ein theoretisch möglichst exaktes Modell in Form einer *Kapazitätskostenrechnung* aufzubauen und zielt dabei vorwiegend auf die Berücksichtigung der Veränderbarkeit von Kapazitäten auf der Basis einzelner Potenzialfaktoren ab. Dabei sollen die aus Kapazitätsanpassungen resultierenden Kosten- bzw. Zahlungsstromkonsequenzen ohne jegliche Proportionalisierung sachlicher Art (Schlüsselung) oder zeitlicher Art (Periodisierung) ausgewiesen werden.

In Anlehnung an RIEBEL (1985) unterscheidet MAYER (1998, S. 49-128) in Leistungskosten, deren Höhe direkt durch die Produktionsmenge determiniert ist, und Bereitschaftskosten, die sich durch den Aufbau bzw. die Aufrechterhaltung von Kapazitäten ergeben. Auch er orientiert sich im Gegensatz zur klassischen Kostenrechnung am pagatorischen Kostenbegriff, d.h. es werden konsequent reine Zahlungsstromveränderungen interpretiert. Um Proportionalisierungen vollständig zu vermeiden, werden Entscheidungen bezüglich variierender Produktionsprogramme nicht auf der Grundlage von Stückkosten bzw. Stückdeckungsbeiträ-

3 Stand der Erkenntnisse

gen, sondern ähnlich wie bei den Betriebsmodellen über den Gesamtkosten- und -deckungsbeitragsvergleich getroffen.

Den Ausgangspunkt jeder Planungsvariante bildet ein geplantes Produktionsprogramm für eine Periode. Alle daraus abgeleiteten Berechnungen stellen Differenzbetrachtungen dieser Planungsvariante zum aktuellen Produktionsprogramm und zu den tatsächlich vorhandenen Kapazitäten dar. Auf der Basis des geplanten Produktionsprogramms werden in Anlehnung an NIEß (1980, S. 56-76) Kapazitätseinlastungs- und -umverteilungsrechnungen durchgeführt, die mögliche bzw. notwendige Veränderungen der Kapazität aufzeigen. Die daraus resultierenden Betriebsbereitschaftsgrade sind an vordefinierte Kapazitätsniveaustufen gekoppelt. Gleichartige Potenzialfaktoren, die übergreifend einsetzbar sind (z.B. Logistikpersonal) werden in sog. ‚Kapazitätspools‘ zusammengefasst.

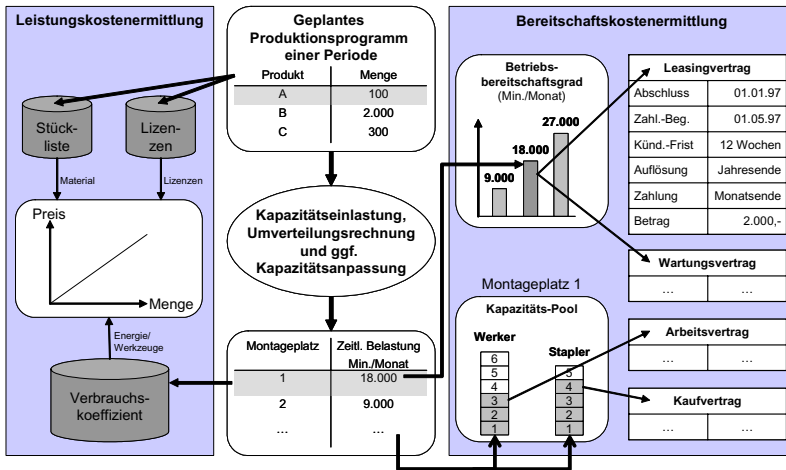


Abbildung 19: Grundprinzip der Kostenermittlung bei der kapazitätsorientierten Kostenrechnung nach MAYER (1998, S. 53)

3.3.1.7 Zusammenfassende Bewertung

Das System der Vollkostenrechnung ist aufgrund der proportionalen Zuordnung von Fixkosten nicht geeignet, um Strukturalternativen vergleichend zu beurteilen. Entscheidungsrelevante Informationen bezüglich der Disponierbarkeit von Fixkosten können nicht abgebildet werden.

Auch im Rahmen der Grenzplankostenrechnung als „kurzfristige Rechnung auf der Basis vorhandener Kapazitäten“ (KILGER 1993, S. 875) sind Fixkosten nicht entscheidungsrelevant. Weder hinsichtlich der Zurechenbarkeit noch der Abbaufähigkeit aus sachlicher oder zeitlicher Sicht werden die Fixkosten einer weiteren Betrachtung unterzogen (REICHMANN & OECKING 1994, S. 252).

Die Dynamische Grenzplankostenrechnung von KILGER (1993) löst sich ebenso wenig von der Prämisse vorgegebener Kapazitäten. Es werden lediglich zuvor als proportional klassifizierte Kostenanteile bei unterjähriger Fristigkeit für den jeweils betrachteten Entscheidungszeitraum den fixen Kosten zugeordnet. Die Differenzierung in Abhängigkeit des Fristigkeitsgrads für verschiedene Planungsprobleme beurteilt KILGER selbst als kritisch.

Bei der Stufenweisen Fixkostendeckungsrechnung wird ebenfalls von gegebenen Kapazitätsstrukturen ausgegangen. Eine für die Entscheidungsfindung relevante Unterscheidung in abbaufähige bzw. nicht abbaufähige Fixkosten wird nicht unterstützt. Außerdem bedingt die hierarchische Zuordnung der Fixkosten eine statische Verknüpfung zwischen Erzeugnissen und Ressourcen bzw. Produktionsbereichen. Daher lassen sich alternative Maschinenbelegungen, wie sie für flexible Produktionssysteme typisch sind, kaum abbilden.

Aufgrund der zeitlichen Differenzierung der Fixkosten ist der Ansatz im Rahmen der Stufenweisen Grenzkostenrechnung von großer Bedeutung. Allerdings wird keine Verbindung zwischen Fixkosten und Bezugsobjekten hergestellt, so dass die Identifikation veränderbarer Kapazitäten und Kosten nur unzureichend gelingt.

Innerhalb der Fixkostenmanagementorientierten Plankostenrechnung lassen sich erstmalig Fixkosten sowohl in Abhängigkeit ihrer sachlichen Veränderbarkeit (Kapazitätsstufen auf Basis der Beschäftigung) als auch ihrer zeitlichen Fristigkeit (Zeitpunkt der Wirksamkeit von Anpassungsmaßnahmen) differenziert darstellen. Das Konzept bildet damit eine gute Ausgangsbasis, um die Kostenauswirkungen bei Anpassung der Kapazitätsstrukturen zu analysieren. Dennoch bleibt der Ansatz unvollständig, da von der Zuordenbarkeit der Fixkosten zu Erzeugnissen bzw. Erzeugnisgruppen explizit ausgegangen wird, ohne dass hierzu die notwendigen Algorithmen aufgezeigt werden. Die daraus abgeleitete produktbezogene Ergebnisbetrachtung erscheint besonders vor dem Hintergrund flexibler Produktionssysteme problematisch.

3 Stand der Erkenntnisse

Das System der relativen Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung setzt im Rahmen der zweckneutralen Grundrechnung eine umfangreiche Sammlung von Kosten- und Erlösinformationen voraus. Die Mehrfachzuordnungen der Informationen in einem mehrdimensionalen Klassifikationssystem erscheinen angesichts der Komplexität des betrieblichen Entscheidungsgefüges für eine effiziente Controlling-Konzeption nicht geeignet (KILGER 1993, S. 90 ff; REICHMANN 1997, S. 126 f.). Zwar vermeidet RIEBEL auf der Grundlage des Identitätsprinzips jegliche Schlüsselung von Kapazitätskosten, allerdings bleibt aufgrund der mangelnden Operationalisierbarkeit die Planungs- und Vorgabefunktion einer entscheidungsorientierten Kostenrechnung in Frage gestellt. Gleichzeitig beziehen sich RIEBELS Aussagen zur Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung vorwiegend auf die Erfassung von Ist-Kosten bzw. Ist-Erlösen und deren Auswertungsprinzipien. Eine Grundrechnung, die für Folgeperioden alle Konsequenzen in Bezug auf die zu erwartenden Zahlungsstromänderungen abbildet, wird nicht diskutiert. Ohne die Definition von Abhängigkeitsbeziehungen zwischen Produktionsprogrammen, Kapazitäten und deren möglichen Veränderungen lassen sich Entscheidungsrechnungen jedoch nicht generieren (MAYER 1998, S. 46).

Betriebsmodelle gehen von weitgehend konstanten Bereitschaftsgraden aus, ohne auf die Veränderbarkeit des Fixkostenblocks durch Auf- oder Abbau von Kapazitäten einzugehen. Diese gehen als Abschreibungen fix in eine Periodenrechnung ein. Dennoch gibt LABMANN interessante Anregungen, da sich aufgrund der Definition von Einflussgrößen und Abhängigkeitsbeziehungen für den mengenmäßigen Produktionsfaktorverbrauch die Kosten zukunftsbezogener Entscheidungsalternativen bestimmen lassen. Zur Ermittlung der relevanten Kosten bzw. Kostenveränderungen werden die Gesamtnettoergebnisse verschiedener Entscheidungsalternativen bezogen auf eine Planungsperiode gegenübergestellt. Vor dem Hintergrund der Flexibilität im Produktionsvollzug erscheint dieser Ansatz besonders zielführend.

In Bezug auf die kontinuierliche Anpassung der Kapazitäten an veränderte Marktbedingungen stellt das Konzept der Kapazitätskostenrechnung im Vergleich zu konventionellen Systemen der Kostenrechnung eine entscheidende Verbesserung dar. Die Auswirkungen kapazitiver Anpassungsmaßnahmen lassen sich mit diesem Modell nahezu ohne Schlüsselung und damit exakt darstellen. Allerdings werden auch bei diesem Ansatz die Kosten für übergreifend nutzbare Potenzialfaktoren wie z.B. Logistikpersonal oder Transportsysteme (Kapazitätspool) über Koeffizienten der zeitlichen Auslastung proportionalisiert. Gleichzeitig bleiben die Auswirkungen des Fabriklayouts auf die Kapazitätsbeanspru-

chung, z.B. durch Mehrmaschinenbedienung, unberücksichtigt. Auf die Kosten, die bei Restrukturierungsprojekten z.B. durch Produktionsunterbrechungen entstehen, wird nicht eingegangen.

3.3.2 Modelle der Investitionsrechnung

Im Gegensatz zur Kosten- und Leistungsrechnung sind die Modelle der Investitionsrechnung nicht für den kontinuierlichen Einsatz im Unternehmen konzipiert. Sie werden vielmehr fallspezifisch im Rahmen der Informationsversorgung für die Planung, Steuerung und Kontrolle von Investitionsvorhaben eingesetzt und sind somit als Sonderrechnung aufzufassen (WEBER 1996b, S. 18-1). Investitionsrechnungen dienen im Allgemeinen der Beantwortung folgender Fragestellungen (BLOHM & LÜDER 1995, S. 49):

- Ist die Durchführung eines geplanten Investitionsprojekts (unter bestimmten Voraussetzungen) absolut vorteilhaft?
- Welches von zwei oder mehreren sich gegenseitig ausschließenden Investitionsprojekten ist relativ vorteilhaft unter der Voraussetzung, dass stets auch die absolute Vorteilhaftigkeit gegeben sein muss?

Die einzelwirtschaftliche Investitionsrechnung lässt sich grundsätzlich in statische und dynamische Verfahren einteilen. Der Unterschied besteht im Wesentlichen darin, dass dynamische Verfahren im Gegensatz zu statischen Verfahren zeitliche Unterschiede im Anfall der Zahlungen einer Investition wertmäßig berücksichtigen. Unter dem Gesichtspunkt der theoretischen Exaktheit sind die dynamischen Verfahren den statischen vorzuziehen. Statische Verfahren können daher in Bezug auf die dynamischen Verfahren auch als Näherungsverfahren interpretiert werden (KÜPPER & KNOOP 1974, S. 60).

Abbildung 20 zeigt eine Übersicht der dynamischen Verfahren. Die empirischen Studien von STAEHELIN (1982: Schweiz), KRIST (1983: Deutschland), PIKE (1983: Großbritannien), MOORE & REICHERT (1983: USA) und WEHRLE-STREIF (1989: Deutschland, Österreich, Schweiz) belegen deutlich, dass die Vermögenswertmethoden und die Kapitalwertmethode im Besonderen in der betrieblichen Praxis immer häufiger den Zinssatzmethoden vorgezogen werden (vgl. auch NIEMANN & WESTKÄMPER 2004). Daher beschränken sich die weiteren Betrachtungen auf die gängigen Verfahren zur Berechnung des Kapitalwertes einer Investition. An dieser Stelle ist lediglich festzuhalten, dass die Kapitalwertmethode

3 Stand der Erkenntnisse

für die Beurteilung von Rekonfigurationsprozessen und der zugehörigen Investitionen hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit keinerlei Einschränkungen unterliegt. Lediglich die Annuitätenmethode als Variante der Kapitalwertmethode kann als ungeeignet angesehen werden, da in der Praxis üblicherweise keine projektbezogenen Ausschüttungen erfolgen und damit die Berechnung von Annuitäten überflüssig wird (BIERGANS 1973, S. 182).

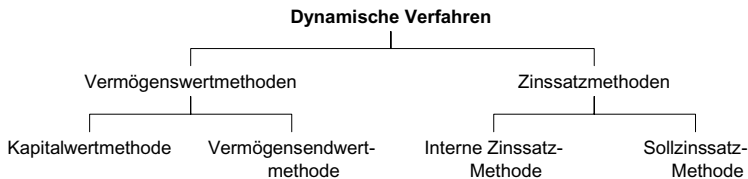


Abbildung 20: Übersicht dynamischer Verfahren der Investitionsrechnung (in Anlehnung an KRUSCHWITZ 1976, S. 245)

3.3.3 Lebenszyklusorientierte Modelle

Ziel einer lebenszyklusorientierten Betrachtungsweise des Gestaltungsobjektes ist es, die Zusammenhänge zwischen frühzeitigen Entscheidungen und deren späteren Konsequenzen darzustellen (BECKER et al. 1997, S. 199). Unabhängig von den speziellen Zielsetzungen und Schwerpunkten verschiedener Lebenszyklusmodelle bildet die phasenorientierte Unterteilung des Lebenszyklus die Basis für die Identifikation phasentypischer Probleme und deren systematische Lösung. Auf dieser Grundlage werden für jede Phase eigene Ziele und Tätigkeiten mit den entsprechenden Methoden und Werkzeugen definiert (WÜBBENHORST 1984, S. 51). Im Vordergrund steht die Analyse der Kostenverursachung entlang der Lebenszyklusphasen, insbesondere während der Nutzungsphase, um Ansatzpunkte zur Reduzierung der Investitions- und Betriebsaufwendungen zu erkennen. Entscheidend ist dabei die ganzheitliche Berücksichtigung von Entscheidungsinterdependenzen zwischen produktionsbezogenen Einmalaufwendungen und Folgeaufwendungen (PERLEWITZ 1999, S. 46).

SESTERHENN (2003) entwickelte eine Bewertungsmethodik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Der Fokus dieses Ansatzes liegt auf der Nutzungsphase des Produktionssystems, die den Produktionsanlauf, den Produktionsbetrieb, die Anpassungen des Produktionsbetriebs und der Produktionsstruktur sowie den Produktionsauslauf umfasst (SESTERHENN 2003, S. 15 f.).

Methoden der Statistik, der strategischen Frühaufklärung und des Szenariomanagements bilden die Grundlage für die Prognose des Produktionsprogramms und der Verläufe signifikanter Einflussgrößen (vgl. PROBST & GOMEZ 1993; GAUSEMEIER et al. 1996). Ziel ist die Entwicklung eines „Variabilitätsportfolios“ mit Normstrategien zur Planung der Kapazitätsanpassungen sowie eines „Kaskadenmodells“ zur Skalierung der quantitativen Kapazität im Produktionslebenszyklus (SESTERHENN 2003, S. 56 ff.). Ein Bewertungsmodell dient dazu, alternative Variabilitätskonzepte unter Berücksichtigung monetärer und nicht-monetärer Ergebnisvariablen zu beurteilen. Die Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen basieren auf dem erweiterten Ressourcenmodell von GUPTA (1998). Damit lässt sich der Zusammenhang zwischen Eingriffen in die Ressourcenstruktur und den kostenseitigen Auswirkungen darstellen. Obwohl im Rahmen der zugrunde gelegten Vollkostenrechnung auch bei SESTERHENN eine Proportionalisierung erfolgt, leistet der ressourcenorientierte Kostenansatz dennoch einen wertvollen Beitrag, um die Abhängigkeiten zwischen Kapazitätsanpassungen und Kosteneffekten darzustellen.

Das skalierbare Modell von BRIEL (2002) dient der Wirtschaftlichkeitsbewertung von Anpassungsinvestitionen entlang der Lebenszyklusphasen (Planung, Anpassung, Nutzung, Stilllegung). Die Basis bildet ein Grundmodell, das anhand der operativen Prozess- bzw. Prozessplanungsergebnisse die durch Anpassungsinvestitionen induzierten Veränderungen der wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit abbildet. Aus dem Grundmodell werden phasenspezifische Modelle abgeleitet, um leistungsbeeinflussende Effekte phasenorientiert zu berücksichtigen. BRIEL setzt sein Hauptaugenmerk auf die erweiterten Gestaltungsmöglichkeiten bei der Produktionsprogrammplanung, die sich aufgrund der durch die Anpassungsinvestition bedingten Leistungssteigerung des Produktionssystems ergeben. Der vorliegenden Arbeit wird jedoch die Annahme zugrunde gelegt, dass das Produktionsprogramm nur bedingt planbar ist und sich vielmehr als Reaktion auf die Veränderung der Märkte quasi ergibt. Damit steht der Vergleich unterschiedlicher Strukturszenarien bei gegebenem Produktionsprogramm im Vordergrund. Dennoch werden nützliche Hinweise zur Bestimmung der Kostenfaktoren bei Anpassungsinvestitionen gegeben.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass eine lebenszyklusorientierte Wirtschaftlichkeitsbetrachtung vorwiegend im Rahmen strategisch motivierter Planungen sinnvoll erscheint, wie z.B. bei der Erneuerung kompletter Produktionsbereiche oder der Verlagerung der Produktion in ein anderes Werk. SESTERHENN (2003, S. 86) räumt ein, dass für den Fall der lebenszyklusorientierten Planung der Produkti-

onssysteme „beispielsweise die Verläufe des strategischen Produktionsprogramms (Produkte und Mengen) mit hundertprozentiger Prognosesicherheit zur Verfügung gestellt werden“ müssten. Ziel der vorliegenden Arbeit ist jedoch die angemessene Reaktion auf ungeplante Veränderungen des Produktionsprogramms. Die Auswirkungen damit verbundener Anpassungsentscheidungen in Bezug auf zukünftige Veränderungen des Unternehmensumfelds können aus Sicht des Autors nicht a priori bestimmt werden. Eine aussagekräftige Bewertung im Rahmen einer lebenszyklusorientierten Betrachtung ist daher nicht möglich. Infolge dessen muss im Hinblick auf die formulierte Aufgabenstellung die Methodik für eine solche Bewertung erst noch zur Verfügung gestellt werden. Dies ist gemäß Kapitel 2 eine der wesentlichen Zielsetzungen dieser Arbeit.

4 Methodik zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen

Aus den bisherigen Erkenntnissen werden im Folgenden der Handlungsbedarf bzw. die Anforderungen an die zu konzipierende Methodik zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen abgeleitet. Anschließend erfolgt eine Beschreibung des grundsätzlichen Aufbaus der Methodik und deren Elemente. Eine ausführliche Herleitung der einzelnen Methodikbausteine findet sich im Anschluss an dieses Kapitel.

4.1 Anforderungen an die Methodik

Die Untersuchung bisheriger Arbeiten hat gezeigt, dass zahlreiche Ansätze innerhalb dieses Themenfeldes existieren. Allerdings konzentrieren sich die meisten Konzepte auf einzelne Teilbereiche des Planungsproblems. Im Folgenden werden die Anforderungen an eine umfassende Planungsunterstützung zusammengefasst.

Für die Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen sind Informationen erforderlich, die zwar nur zeitweilig benötigt werden, jedoch bei der situationsbezogenen Erfassung zu erheblichen Planungsverzögerungen führen können. Daher müssen zusätzlich zu den in der Regel innerhalb der PPS- bzw. BDE-Systeme abrufbaren Informationen weitere Daten für die Planung vorgehalten werden. Dazu zählen Auskünfte über die Veränderungsfähigkeit von Kapazitäten unter Berücksichtigung zeitlicher Bindungsfristen oder Vorlaufzeiten sowie deren kostenseitige Auswirkung. Gleichzeitig sind relevante Informationen zur Bewertung des Rekonfigurationsaufwands bereitzustellen. So haben z.B. die Zeiten für die De- bzw. Remontage von Anlagen und die daraus resultierenden Kosten einen entscheidenden Einfluss bei der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit von Rekonfigurationsprozessen.

Ausgangspunkt für die Planung von Strukturanpassungen ist die Identifikation des Anpassungsbedarfs. Da im Rahmen dieser Arbeit die Anpassungen der Bereichs- und Betriebsmittelstruktur, d.h. die Art, Anzahl und Anordnung von Betriebsmitteln, betrachtet wird, soll sich ein Controllinginstrument auf die strukturrelevanten Kennzahlen beschränken. Strukturelevante Kennzahlen geben Hinweise auf die Effizienz der Produktionsstruktur, die durch ablauforganisatorische

4 Methodik zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen

Maßnahmen, wie z.B. eine Änderung der Auftragsreihenfolge oder eine Anpassung der Losgröße, nicht weiter gesteigert werden kann. Es wird vorausgesetzt, dass zunächst alle Erfolgspotenziale der Produktionssteuerung ausgeschöpft sind, bevor Eingriffe in die Produktionsstruktur in Betracht gezogen werden. Die Effizienz der Produktionsstruktur und der Kapazitätsstruktur im Besonderen wird maßgeblich durch die Entwicklung des Produktionsprogramms bestimmt. Daher ist eine Analyse des Produktionsumfelds erforderlich, um Korrelationen zwischen Veränderungen des Produktionsprogramms und der Struktureffizienz aufzeigen zu können. Im Vordergrund steht dabei die Unterscheidung von mittel- bis langfristigen Trends von kurzfristigen Schwankungen. Gleichzeitig sollte das Controllinginstrument die Identifikation der von Umfeldveränderungen betroffenen Bereiche unterstützen und Hilfestellung bei der Auswahl geeigneter Maßnahmen zur Strukturanpassung geben.

Nach POUGET (2000, S. 3) lässt sich die Forderung nach stetiger Produktivitätssteigerung entweder durch eine Optimierung der bestehenden Lösung oder aber durch die Realisierung eines vollständig andersartigen Konzepts umsetzen. Im Hinblick auf den Ressourceneinsatz bedeutet dies, dass entweder die Ressourcenauslastung zu maximieren ist oder kurzfristig neuartige Produktionsressourcen herangezogen werden müssen. Um die Überführung einer ursprünglich optimalen Struktur in eine gewachsene Struktur durch die Anwendung von Einzelmaßnahmen zu vermeiden, ist eine ganzheitliche Betrachtung des Planungsproblems trotz der Lokalisierung konkreter Problemfelder notwendig. Dies betrifft vor allem die Anpassung der Kapazitätsstruktur bei verändertem Produktionsprogramm. Hier soll ausgehend von der Lokalisierung konkreter Problemfelder, wie z.B. die Ermittlung von Engpassmaschinen, eine Optimierung der gesamten Produktionsstruktur erfolgen. Das schließt die Berücksichtigung virtueller Kapazitäten geplanter bzw. zu planender Investitionen ein.

Eingriffe in die Kapazitätsstruktur bleiben in der Regel nicht ohne Eingriffe in das Fabriklayout. Um den Prozess der Layoutplanung zu beschleunigen, sollen rechnerbasierte Verfahren den Planer bei der Erstellung von Layoutvarianten unterstützen. Ziel ist dabei die Einbindung wirklichkeitsnaher Restriktionen, ohne die Problemkomplexität bis zum Lösungsdefekt zu steigern. Daneben soll der Planer nicht nur zum Ende der Planung die Möglichkeit haben, Eingriffe in das Layout vorzunehmen. Vielmehr soll durch die Eingabe von Randbedingungen zu Planungsbeginn das Planungsergebnis beeinflussbar sein. Darüber hinaus ist die Kopplung der geplanten Produktionsstruktur mit einer Ablaufsimulation notwen-

dig, um dynamische Komponenten im Hinblick auf eine verursachungsgerechte Kostenbewertung evaluieren zu können.

Die Migration der aktuellen Struktur in das geplante Konzept ist ein komplexes Problem, das ebenfalls eine Planungsunterstützung erfordert. Ziel ist neben der Optimierung des Zeitablaufs bei der Umsetzung der neuen Struktur die Bewertung der notwendigen Rekonfigurationsaufwände. Dabei sollen auch dynamische Aspekte durch mögliche Produktionsunterbrechungen kostenseitig bestimmt werden. Zusammen mit der Bemessung der kostenseitigen Auswirkungen von Kapazitäts- bzw. Strukturveränderungen lässt sich die Wirtschaftlichkeit von Rekonfigurationsprozessen mit Rücksicht auf die Rentabilitätsvorstellungen des Unternehmens exakt beurteilen.

In Anlehnung an MAYER (1998, S. 3) sind im Rahmen einer entscheidungsorientierten Ausrichtung der Kostenrechnung folgende Fragestellungen zu beantworten:

- Wie verändert sich der Ressourcenbedarf, insbesondere von Potentialfaktoren (Kapazitäten), bei Veränderungen des Absatz- und Produktionsprogramms?
- In welchem Bereich und in welcher Höhe sind Kapazitäten aufbau- bzw. abbaubar?
- Welche zeitlichen Verzögerungen (Kostenremanenzen) entstehen bei Auf- bzw. Abbau von Kapazitäten?
- Welchen Einfluss haben Veränderungen im Kostengefüge?

Um die Funktion der Entscheidungsunterstützung zu erfüllen, muss die Kostenrechnung in der Lage sein, die für die Kapazitätsplanung relevanten Kosten aufzuzeigen. Nach HUMMEL (1992, S. 79) lassen sich entscheidungsrelevante Kosten als „erwartete, zukünftige noch beeinflussbare, alternativenspezifische Kosten“ definieren.

4.2 Aufbau der Methodik

Rekonfigurationsprozesse lassen sich in drei Phasen gliedern. Die erste Phase dient der Identifikation des Bedarfs zur Strukturadaptation. Ihr geht die kontinuierliche Überwachung der Produktionsstruktur und ihrer Effizienz voraus. Die zweite Phase umfasst die Planung des eigentlichen Rekonfigurationsprozesses ausgehend von den identifizierten Problemfeldern. Die daraus resultierenden Struktur-

4 Methodik zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen

alternativen müssen in der letzten Phase bewertet und miteinander verglichen werden. Dementsprechend gliedert sich die Methodik in drei Module (Abbildung 21), die im Rahmen der vorliegenden Arbeit konzeptioniert und bezüglich ihrer Anwendung veranschaulicht werden.

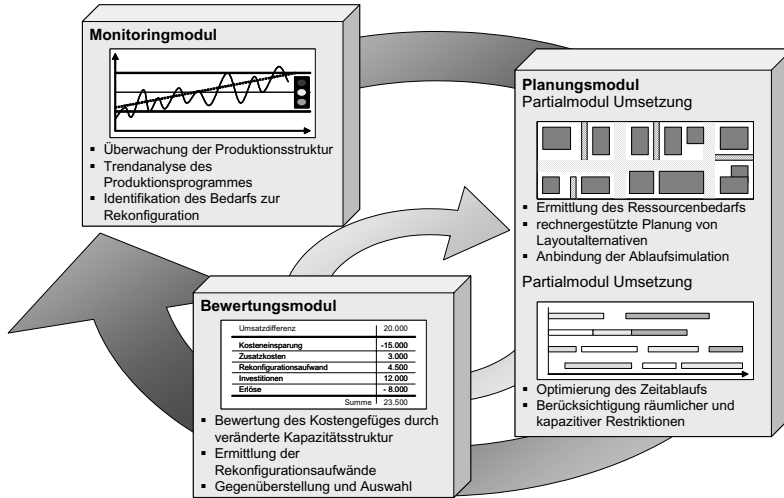


Abbildung 21: Aufbau der Methodik zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen

Die Aufgabe des *Monitoringmoduls* ist die Feststellung des Bedarfs zur Rekonfiguration. Dafür wird die Effizienz der aktuellen Produktionskonfiguration kontinuierlich über strukturelevante Kennzahlen bewertet. Gleichzeitig wird die Entwicklung des Produktionsprogramms permanent überwacht, um mittel- bis langfristige Trends ableiten zu können. So lassen sich Korrelationen zwischen dem Verlauf des Produktionsprogramms und der Struktureffizienz ermitteln, die neben singulären Ereignissen, wie z.B. die Einführung neuer Produkte, Auslöser für Rekonfigurationsprozesse sein können. Ein Beispiel sind sinkende Stückzahlen, die zu Unterauslastungen und damit zu steigenden Fixkosten bei der Stückkostenermittlung führen. Neben der eigentlichen Anregungsinformation zur Strukturadaptation geben die im Monitoringmodul definierten Kennzahlen eine Hilfestellung bei der Ableitung geeigneter Maßnahmen zur Effizienzsteigerung.

Das *Planungsmodul* ist analog zum Planungsprozess zweigeteilt. Im ersten Schritt geht es um die Ermittlung einer optimierten Produktionsstruktur (*Parti-*

almodul Optimierung). Der zweite Schritt beschäftigt sich ausgehend von der aktuellen Produktionsstruktur mit der Umsetzung des Sollkonzepts (*Partialmodul Umsetzung*). Im Partialmodul Optimierung wird der Ressourcenbedarf in Abhängigkeit von der Produktionsprogrammentwicklung ermittelt. Die Auswirkungen von Kapazitätsanpassungen werden durch ein rechnergestütztes Verfahren zur Entwicklung von Layoutalternativen erfasst. Ziel ist dabei die Fokussierung der planerischen Tätigkeit auf die Lösungsbewertung. Das Planungsmodul ist an eine Ablaufsimulation gekoppelt, um die dynamischen Effekte, die sich aus Veränderungen des Produktionslayouts ergeben, zu evaluieren. So lassen sich z.B. die Auslastung der Transportmittel und daraus resultierende Einsparungspotenziale abbilden.

Das Partialmodul Umsetzung plant ausgehend von dem bestehenden Layout die Migration in die Sollstruktur. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Optimierung des zeitlichen Ablaufs bei der Umsetzung, um Produktionsunterbrechungen soweit als möglich zu vermeiden. Dabei werden sowohl räumliche als auch kapazitive Restriktionen berücksichtigt. Räumliche Restriktionen beziehen sich auf die Anzahl zur Verfügung stehender Wechselflächen, um z.B. den Positionsaustausch zweier Anlagen zu vollziehen. Dies hat maßgebliche Konsequenzen auf die mögliche Reihenfolge der Maschinenanordnung. Gleichzeitig behindern kapazitive Restriktionen, wie z.B. die Anzahl und Art von Transportkränen, die mögliche Parallelisierung von Umsetzungsschritten.

Innerhalb des *Bewertungsmoduls* werden die Veränderungen im Kostengefüge unter Berücksichtigung zeitlicher Restriktionen bei der Anpassung der Kapazitätsstruktur ermittelt. Zeitliche Einschränkungen ergeben sich z.B. aus den Vorlaufzeiten bei der Beschaffung neuer Anlagen oder den Bindungsfristen bei der Kündigung von Leasingverträgen. Ziel ist die Bewertung des Periodenerfolgs bei veränderter Produktionsstruktur. Neben der Abschätzung der Nutzenpotenziale werden die Aufwände für die Rekonfiguration kostenmäßig zusammengefasst. Dazu zählen nicht nur die Investitionen für die Anschaffung von Betriebsmitteln. Vielmehr sind die rekonfigurationsspezifischen (z.B. De- und Remontagekosten) und umsetzungsabhängigen Kosten (z.B. Produktionsunterbrechung, Teilevorlauf) einzubeziehen. Aus der Gegenüberstellung der Einsparpotenziale und Rekonfigurationskosten lässt sich eine Investitionsbewertung ableiten und mit den Rentabilitätsvorgaben des Unternehmens vergleichen.

4 Methodik zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen

Die nachfolgenden Kapitel 5, 6 und 7 beschreiben in dieser Reihenfolge die im Rahmen dieser Arbeit vorgenommene Konzeption des Monitoringmoduls, des Planungsmoduls und des Bewertungsmoduls.

5 Konzeption des Monitoringmoduls

Bislang wurde in den Unternehmen der Prozess der Produktionssystemplanung nicht zuletzt aufgrund der hohen Investitionssummen häufig nur durch das Auftreten unvorhergesehener Ereignisse, wie z.B. Technologiesprünge, initiiert. Die Entwicklungen im Produktionsumfeld hingegen verlaufen nicht sprunghaft, sondern oft kontinuierlich und lassen sich in einem gewissen Rahmen mit der bestehenden Struktur bewältigen. In diesem Fall besteht die Gefahr eines schleichenden Effizienzverlusts des Produktionssystems (LOEPER 1995, S. 3). Um dauerhaft wettbewerbsfähig zu bleiben, ist es für Unternehmen notwendig, „einmal geplante Produktionen permanent zu überwachen und deren Funktionalität gegenüber geänderten Randbedingungen ... zu überprüfen“ (KUPRAT 1991, S. 45). Die nachfolgend beschriebene Konzeption eines Monitoringmoduls soll die Erfüllung dieser Anforderung ermöglichen.

5.1 Aufbau eines Kennzahlensystems zur Strukturüberwachung

Das Kennzahlensystem muss grundsätzlich zwei Funktionen erfüllen. Zum einen sind die Verläufe der periodisch ermittelten Kennzahlen im Sinne einer Kontrollfunktion auszuwerten, um signifikante Abweichungen festzustellen. Zum anderen ist die Interpretation dieser Veränderungen Teil der Anregungsfunktion, die als Auslöser für Rekonfigurationsprozesse dient. Die häufig von Kennzahlensystemen geforderte Operationalisierungsfunktion, die systematisch Möglichkeiten für Korrekturen und deren Nutzen aufzeigt, wird bei der Konzeption des Planungs- und Bewertungsmoduls umgesetzt. Aufgrund der Komplexität der Problemstellung erscheint das Aufzeigen konkreter Lösungsansätze in einem hierarchisch aufgebauten Rechenystem zur Darstellung quantitativer Beziehungen nicht zielführend.

5.1.1 Ableitung strukturerelevanter Kennzahlen

Das Kennzahlensystem dient der Überwachung der Produktionsstruktur und gegebenenfalls der Anregung von Rekonfigurationsprozessen. Unter der Produktionsstruktur wird die Anzahl, Art und Anordnung von Betriebsmitteln verstanden. Daher muss zwischen strukturelevanten und ablauforientierten Kennzahlen unterschieden werden. Ein Beispiel für eine ablauforientierte Kennzahl ist der Ma-

5 Konzeption des Monitoringmoduls

terialbestand, der vorwiegend durch die angewendete Steuerungsstrategie (Bereitstellungsverfahren, Lösgröße etc.) und nur in geringem Maße durch die Struktur determiniert wird. Mit Strukturrelevanz wird die Eigenschaft einer Kennzahl bezeichnet, Aussagen über die Eignung einer Produktionsstruktur treffen zu können. Im Folgenden werden im Sinne der Aufgabenstellung nur strukturelevante Kennzahlen weiter berücksichtigt.

Aus Kundensicht wahrnehmbare Marktleistungen sind Lieferzeit, Kosten und Qualität (LOEPER 1995, S. 41 f.). Der Qualitätsaspekt wird in dieser Arbeit aus zwei Gründen ausgeklammert. Zum einen bildet die Sicherung der Qualität als Grundvoraussetzung für eine erfolgreiche Geschäftsentwicklung in Form von Qualitätssicherungssystemen (z.B. Total Quality Management) einen eigenen Teilkomplex, der nicht Bestandteil der Aufgabenstellung ist. Zum anderen können strukturebedingte Qualitätsprobleme (z.B. Toleranzabweichungen in Folge von Ermüdungserscheinungen an Betriebsmitteln) als singuläre Ereignisse (vgl. Abschnitt 5.2.1) interpretiert werden, die Rekonfigurationsprozesse anstoßen können. Sie sind jedoch unabhängig von der Entwicklung des Produktionsprogramms und werden daher nicht weiter berücksichtigt.

In vielen Bereichen der Industrie, wie z.B. der Automobilbranche, werden Lieferverzögerungen kaum toleriert und gegebenenfalls mit hohen Konventionalstrafen belegt. Die Lieferzeit gegenüber dem Kunden wird maßgeblich über die Durchlaufzeit in der Produktion beeinflusst (STALK & HOUT 1990, S. 15). Nach REFA (1991, S. 15) ist die Durchlaufzeit die Zeit „für die Erfüllung einer Aufgabe in einem oder mehreren bestimmten Arbeitssystemen.“ Sie wird neben der gewählten Steuerungsstrategie nachhaltig durch die verfügbare Kapazität, die eingesetzte Fertigungstechnologie (Art der Betriebsmittel) und die Betriebsmittelzuordnung, d.h. die Produktionsstruktur, determiniert. Die Lieferzeit kann daher als entscheidendes Leistungsmerkmal zur Beurteilung der Produktionsstruktur angesehen werden.

Der Begriff Kapazität bezeichnet das Leistungsvermögen einer wirtschaftlichen oder technischen Einheit beliebiger Art, Größe und Struktur in einem Zeitausschnitt. Damit wird ein Potenzial zum Ausdruck gebracht, das durch seine Nutzung im Zeitablauf technische oder wirtschaftliche Leistungen erbringen kann (KERN 1962, S. 27). Als maßgebliche Bestimmungsgröße für das Leistungsvermögen eines Unternehmens spielt die Kapazität auch eine entscheidende Rolle für die Fristigkeit der Kapitalbindung sowie die Ein- und Auszahlungsströme des Unternehmens (STÜTZLE 1987, S. 12 f.).

Die Kosten sind nicht nur aus Kundensicht ein wichtiges Kriterium für den Aufbau einer Geschäftsbeziehung. Da sich einmalig ermittelte bzw. verhandelte Verkaufspreise in der Regel nur nach unten korrigieren lassen, ist es für Unternehmen umso wichtiger, die entstehenden Selbstkosten kontinuierlich zu überwachen. Der Kostenbezug auf einzelne Produkte bzw. Produktgruppen ist dabei unabdingbar, um Anregungsinformationen hinsichtlich der Rentabilität bei der Zusammensetzung des Produktionsprogramms zu erhalten. Die in der Produktion entstehenden Kosten sind maßgeblich durch die Struktur, d.h. die Anzahl und Art der Betriebsmittel, sowie deren Nutzung bestimmt. So muss z.B. ein Ansteigen der Stückkosten in Folge von Unterauslastungen bereits in einem frühen Stadium erkannt werden, um rechtzeitig adäquate Gegenmaßnahmen einleiten zu können.

Effizienz wird allgemein definiert als das Verhältnis von Leistung und Kosten (vgl. VDI 4400, S. 3). Sowohl eine leistungs- als auch eine kostenorientierte Betrachtung der Produktionsstruktur kann jedoch nur dann sinnvolle Anregungsinformationen geben, wenn die Belastung des Produktionssystems mitberücksichtigt wird. Diese kann in Form der Auslastung von Betriebsmitteln gemessen werden. Überauslastungen können sich negativ auf die Durchlaufzeit auswirken, während Unterauslastungen zu steigenden Stückkosten führen. Daher ist eine nutzungsorientierte Betrachtung zur Unterstützung einer aussagekräftigen Effizienzbeurteilung unerlässlich (Abbildung 22).

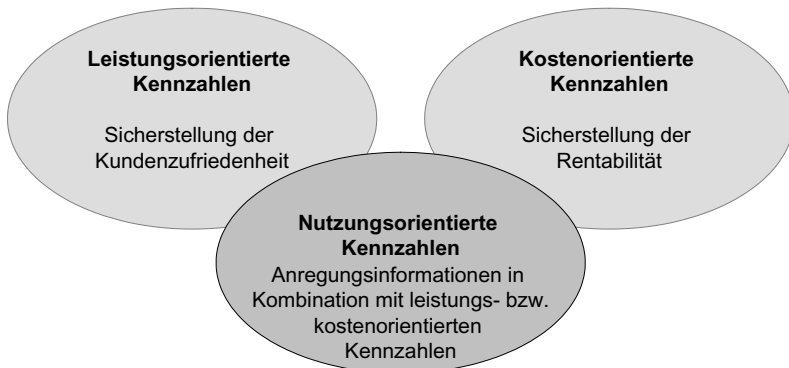


Abbildung 22: Elemente des Kennzahlensystems

5.1.2 Leistungsorientierte Kennzahlen

Häufig werden zur Bewertung der Logistikleistung die Liefertreue und die Lieferzeit hierarchisch gleichgesetzt (vgl. VDI 4400, S. 3). Aus einer kundenorientierten Sichtweise kann die Lieferzeit jedoch als gegebene Anforderung bzw. Voraussetzung für einen Auftrag angesehen werden, deren Einhaltung sich über das Qualitätsmerkmal der Liefertreue bemisst. Die *Liefertreue* wird daher in der hierarchischen Gliederung als Spitzenkennzahl definiert. Eine weitere Unterscheidung in Liefertermin- und Liefermengentreue ist nicht notwendig, da eine Abweichung der Liefermenge in der Regel nicht akzeptiert wird und als zu früh bzw. zu spät gelieferte Leistung interpretiert und gemessen werden kann. Die Liefertreue wird daher mit der Liefertermintreue gleich gesetzt. Sie ist bezogen auf ein Produkt i nach VDI 4400 (S. 12) definiert als

$$\text{Liefertreue}_i = \left(\frac{\text{Anzahl termintreuer Produktionsaufträge}}{\text{Anzahl Produktionsaufträge}} \right)_i \quad (1)$$

Im Folgenden wird die Lieferzeit durch die *Durchlaufzeit* ersetzt, da eine mangelnde Liefertreue, die auf den Bereich der Produktion zurückgeführt werden kann, maßgeblich durch zu lange Durchlaufzeiten hervorgerufen wird.

Die Durchlaufzeit setzt sich aus der planmäßigen Durchlaufzeit und der Zusatzzeit zusammen. Die planmäßige Durchlaufzeit ist die Summe aus Durchführungszeit und Zwischenzeit. Die Durchführungszeit besteht ihrerseits aus der Hauptdurchführungszeit (Bearbeitungszeit) und der Nebendurchführungszeit (Rüstzeit). Als Zwischenzeit wird die geplante Zeit zwischen der Beendigung eines Arbeitsvorgangs und dem Beginn des nächsten Arbeitsvorgangs bezeichnet. Bestandteile der Zwischenzeit sind die Liegezeit vor der Bearbeitung, die Transportzeit und die Liegezeit nach der Bearbeitung. Zusatzzeiten beinhalten zusätzliche Durchführungen und störungsbedingtes Unterbrechen der Tätigkeit.

Die Zwischenzeit und die Zusatzzeit stellen beide nicht wertschöpfende Verzögerungen im Produktionsprozess dar. Die Zusatzzeiten sind im Gegensatz zu den Zwischenzeiten nicht planbar. Die Komponenten der Zusatzzeit definiert REFA (1991, S. 26) folgendermaßen: „Zeitbestimmend können hier die Menschen (z.B. Fehlzeiten), die Betriebsmittel (z.B. Störungen) oder das Material beziehungsweise die Information (z.B. Beschaffungsmängel) sein.“

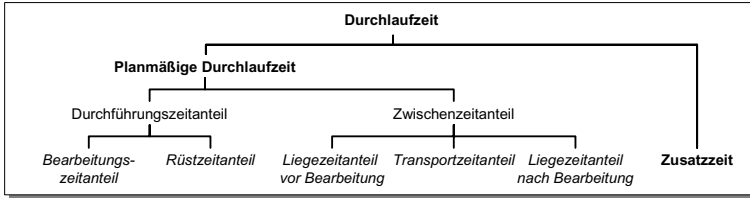


Abbildung 23: Bestandteile der Durchlaufzeit in Anlehnung an REFA (1991)

Die Bearbeitungszeit unterliegt in der Regel keiner Veränderung, es sei denn, die Arbeitsgeschwindigkeit des Betriebsmittels wurde zur Einhaltung der Qualitätsrichtlinien oder altersbedingt bewusst zurückgesetzt. Die planmäßige Durchlaufzeit wird daher vorwiegend über die Abweichung der Rüstzeit- bzw. Zwischenzeitanteile beeinflusst. Setzt man voraus, dass die Losgröße im Rahmen der Steuerungsstrategie bereits unter ökonomischen Gesichtspunkten optimiert wurde, deutet eine gestiegene Rüstzeit auf eine intensivere Belegung der Maschine mit unterschiedlichen Produkten bzw. Varianten hin. In diesem Fall ist zu überprüfen, ob eine Reduzierung der zugeordneten Produkte über eine alternative Maschinenbelegung möglich bzw. sinnvoll ist.

Der Hauptgrund für eine sinkende Termintreue liegt jedoch meistens in dem Anstieg des Zwischenzeitanteils. So führen vor allem Engpässe zu längeren Liegezeiten, während die Transportzeit über das Fabriklayout und das zugewiesene Transportmittel determiniert wird und daher in der Regel bei gleich bleibendem Layout kaum veränderlich ist. Eine Aufschlüsselung der Zwischenzeit gestaltet sich in der betrieblichen Praxis häufig als sehr schwierig. WIENDAHL (1987, S. 52 f) bezeichnet in diesem Zusammenhang die Summe aus Liege- und Transportzeiten auch als Übergangszeit. Eine Interpretation der Zwischenzeit muss daher in Kombination mit zusätzlichen Kennzahlen getroffen werden (vgl. Abschnitt 5.1.3).

5.1.3 Nutzungsorientierte Kennzahlen

Wie bereits erwähnt, können ohne die Berücksichtigung der Produktionssystembelastung keine sinnvollen Anregungsinformationen über eine notwendige Anpassung der Produktionsstruktur erhalten werden. Daher werden nun nutzungsorientierte Kennzahlen als Bindeglied zwischen der leistungs- und der kostenbezogenen Betrachtungsweise eingehend beschrieben.

5 Konzeption des Monitoringmoduls

Es gilt:

$$\text{Betriebsmittelauslastung}_i = \left(\frac{\text{tatsächliche Betriebsmittelnutzung}}{\text{verfügbare Betriebsmittelkapazität}} \right)_i \quad (2)$$

Die Belastung des Produktionssystems kann über die *Auslastung* der Betriebsmittel gemessen werden. Unter Betriebsmitteln werden hier Arbeitsplätze sowie Transport- und Verkettungsmittel subsumiert. Handarbeitsplätze unterscheiden sich von Maschinenarbeitsplätzen in erster Linie durch die Höhe der erforderlichen Investitionen, können aber im Rahmen der Strukturanalyse analog behandelt werden. Die Auslastung eines Betriebsmittels gibt die tatsächliche Nutzung im Verhältnis zur theoretisch verfügbaren bzw. festgelegten Kapazität an (2). Die Summe der Bearbeitungszeiten bestimmt die tatsächliche Nutzung des Arbeitsplatzes. Häufig wird zur Auslastungsermittlung die Belegungszeit zugrunde gelegt, in die auch Rüstzeiten eingerechnet werden. Dies ist jedoch im Hinblick auf die Analyse der kostenmäßigen Auswirkungen von Auslastungsschwankungen der falsche Ansatz. So würde bei konstanten Bearbeitungszeiten ein steigender Rüstzeitanteil zu einer höheren Auslastung führen. Wie im folgenden Abschnitt noch erläutert wird, hätte dies irreführender Weise sinkende Stückkosten zur Folge. Die restlichen Zeiten sind unproduktiv und durch personalbedingte Stillstände sowie Logistik- oder Maschinenstörung bedingt (Abbildung 24).

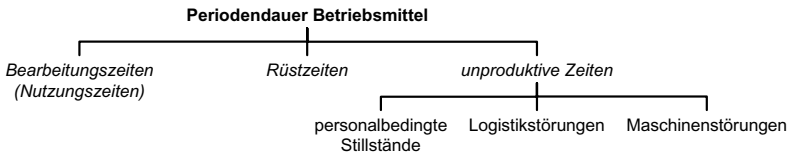


Abbildung 24: Zeitanteile eines Betriebsmittels

Bei der Auslastung der Transportmittel müssen zwei Fälle unterschieden werden. Die Auslastung von Transportmitteln, die wie Arbeitsplätze mit (Transport-) Aufträgen belegt werden, kann analog zu (2) ermittelt werden. Hierzu zählen z.B. Gabelstapler oder fahrerlose Transportsysteme (FTS). Bei Transportmitteln, deren Belegung nicht zeitmäßig erfasst werden kann, wird die Auslastung anhand der Förderleistung angegeben (3):

$$\text{Transportmittelauslastung}_i = \left(\frac{\text{tatsächliche Förderleistung}}{\text{verfügbare Förderleistung}} \right)_i \quad (3)$$

Bei Kenntnis der Auslastungen können in Kombination mit der Durchlaufzeitanalyse Hinweise auf notwendige Strukturanpassungen gegeben werden. Ein Anstieg der Zwischenzeit ist dabei besonders interessant, da er in der Regel auf Engpässe zurückzuführen ist. Da eine Erfassung der untergeordneten Zeitanteile in der Praxis häufig kaum möglich oder nur mit sehr großem Aufwand zu bewerkstelligen ist, können die Engpässe nicht direkt identifiziert werden. Eine Untersuchung der Betriebsmittelauslastung entlang des Produktionsprozesses kann hier die notwendigen Anregungsinformationen geben.

Es sei angemerkt, dass im Hinblick auf die Leistungsgröße Durchlaufzeit bzw. Liefertreue nur Überauslastungen zu Problemen führen. Die Betriebsmittelauslastung hat einen direkten Einfluss auf die stückbezogenen Kosten. So ergeben Unterauslastungen, dass die Fixkosten auf weniger Produkte umgelegt werden können. Die kostenseitigen Auswirkungen werden im folgenden Abschnitt detailliert beschrieben.

5.1.4 Kostenorientierte Kennzahlen

Im Automobilbau betragen 1990 die direkt zurechenbaren Einzelkosten nur noch 18 Prozent, wobei in Zukunft mit einer Abnahme auf acht bis zwölf Prozent gerechnet wird (DRUCKER 1991, S. 11). Dadurch gewinnt eine eingehende Betrachtung der Fixkosten, die vorwiegend durch die gewählte Produktionsstruktur determiniert werden, zunehmend an Bedeutung.

„Kosten sind der wertmäßige, betriebsnotwendige Normalverbrauch an Gütern und Leistungen zur Erstellung des Betriebsproduktes“ (MELLEROWICZ 1962, S. 18). Kosten stellen einerseits einen bewerteten Ressourcenverbrauch dar, der proportional zur zeitlichen Inanspruchnahme der einzelnen Ressourcen ist, andererseits beinhalten sie aber immer auch einen fixen Anteil, der durch die verwendeten Betriebsmittel bestimmt wird. Somit sind die proportionalen Kosten eine aggregierte Größe, deren Veränderung im Kontext mit der zeitlichen Inanspruchnahme zu sehen ist. Der fixe Anteil hingegen muss im Zusammenhang mit den Betriebsmitteln gesehen werden und kann nur durch Anpassungen im Betriebsmittelbestand verändert werden.

Eine kostenträgerbezogene Sichtweise in Form der *Stückkosten* bietet sich an, da in den meisten Fällen im Rahmen der Produktionsprogrammplanung bereits Preisuntergrenzen, d.h. Stückkosten, zu denen eine wirtschaftliche Produktion

noch möglich ist, ermittelt wurden. Sie stellen daher ein ideales Instrument dar, um kritische Abweichungen festzustellen.

5.1.4.1 Einsatz der Maschinenstundensatzrechnung

Eine absolut verursachungsgerechte Kostenzurechnung auf Produkte gemäß der tatsächlichen Ressourceninanspruchnahme ist mit einer Zuschlagskalkulation (prozentualer Zuschlag der Gemeinkosten auf die Einzel- bzw. Herstellkosten) nicht möglich. Insbesondere in anlagenintensiven Fertigungsbetrieben mit einer heterogenen Produkt- und Fertigungsstruktur hat man hieraus mit dem Einsatz der *Maschinenstundensatzrechnung* kostenrechnerische Konsequenzen gezogen (MÜLLER et al. 2003, S. 178). Ziel der Maschinenstundensatzrechnung ist eine differenzierte Produktkalkulation gemäß der in Anspruch genommenen Ressourcen im Produktionsprozess. Die Maschinenstundensatzrechnung ist somit eine spezielle, produktionsorientierte Variante der Prozesskostenrechnung (HAHN & KAUFMANN 1997, S. 97 ff.).

Zwar kann auch die Maschinenstundensatzrechnung die Defizite konventioneller Kostenrechnungsverfahren hinsichtlich der Veränderbarkeit der Kapazitäten nicht überwinden (vgl. Abschnitt 3.3.1). Dennoch ist es möglich, über die Berücksichtigung der Ressourceninanspruchnahme die Auswirkungen von Auslastungsschwankungen zu ermitteln, um daraus Handlungsbedarfe im Hinblick auf die Ressourcenstruktur abzuleiten.

Die Maschinenstundensatzrechnung erfordert eine detaillierte Kostenstelleneinteilung im Produktionsbereich bis hin zu einzelnen Arbeitsplätzen mit einer genauen Erfassung der anfallenden Aufwände als Kostenstelleneinzelkosten. Die Gemeinkosten des Produktionsbereichs werden in der Regel über Umlagen oder innerbetriebliche Leistungsverrechnung auf die Kostenstellen und über den Maschinenstundensatz auf die Produkte weiter verrechnet. Diese Vorgehensweise ermöglicht zwar keine theoretisch exakte kostenträgerbezogene Zuordnung der Kosten, ist aber in der betrieblichen Landschaft gängige Praxis und wird daher für die weiteren Überlegungen übernommen. Die Problematik der unzulässigen Proportionalisierung von Kosten wird bei der Konzeption des Bewertungsmoduls durch den Einsatz einer kostenträgerneutralen Kostenrechnung umgangen (vgl. Kapitel 7).

Für die Ermittlung von Abweichungen ist zunächst der *Planverrechnungssatz* zu ermitteln. Dieser ergibt sich aus folgender Beziehung (KILGER 1993, S. 297):

$$\text{Planverrechnungssatz} = \frac{\text{Plankosten der Kostenstelle (Einzel- und Gemeinkosten)}}{\text{Geplante Maschinennutzung (Planbeschäftigung)}} \quad (4)$$

Die zu planenden Kosten werden kostenartenweise in leistungsunabhängige (fixe) und leistungsabhängige (variable bzw. proportionale) Kosten aufgegliedert (Tabelle 2).

Plankosten je Monat		Kostenstelle 9999		
Zeile	Kostenarten	Plankosten		
		fix	prop.	gesamt
1	Einzelkostenlöhne		5.000	5.000
2	Energie	1.200	9.000	10.200
3	Werkzeuge		1.500	1.500
4	Betriebsstoffe		750	750
5	Instandhaltung	3.500	13.500	17.000
6	Abschreibungen	10.000		10.000
7	Zinsen	3.000		3.000
8	Produktionslogistik	1.000		1.000
Kostenstelleneinzelkosten		18.700	29.750	48.450
10	Umlagen PPS, Disposition	5.500		5.500
11	Umlagen Betriebsleitung	7.000		7.000
12	Umlagen Grundstück/Gebäude	10.500		10.500
13	Umlagen Verw.-Gemeinkosten	9.200		9.200
Gesamtkosten der Kostenstelle		50.900	29.750	80.650

Tabelle 2: Beispiel einer Kostenstellenrechnung auf Basis einer flexiblen Plankostenrechnung

Über die innerbetriebliche Leistungsverrechnung wird ein Teil der Kosten (z.B. der Aufwand für die Produktionslogistik) auf die Kostenstelle verrechnet (KILGER 1993, S. 437 ff.). Dies ist theoretisch nur zulässig, so lange diese Kosten direkt durch die jeweilige Kostenstelle veranlasst werden. Da der Rechnungsaufwand mit der Anzahl zusätzlicher Kostenstellen steigt, sind hier Vor- und Nachteile gegeneinander abzuwägen. Auch die Projektion weiterer fixer Gemeinkosten vereinfacht zwar die Kalkulation, eine verursachungsgerechte und transparente Zuordnung der Kostenumlagen kann damit allerdings nicht sichergestellt werden. Gegebenenfalls ist hier die Ermittlung geeigneter Prozesskostensätze, die direkt auf einzelne Produkte verrechnet werden können, in Erwägung zu ziehen (SCHWEITZER & KÜPPER 1998, S. 334 ff.). Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass Systeme der Vollkostenrechnung keine exakten Informationen über Preisuntergrenzen liefern können, da die zugrunde liegende Verteilung der Fixkosten und der Gemeinkosten nicht notwendiger Weise der am Markt erzielbaren Deckung entspricht (SWOBODA 1969, S. 32 ff.).

5 Konzeption des Monitoringmoduls

Die Entwicklung einer möglichst exakten Produktkalkulation ist nicht Teil der Aufgabenstellung dieser Arbeit. Die absolute Höhe der Stückkosten ist für die weiteren Überlegungen nicht ausschlaggebend. „Die Schnelligkeit der Informationsgewinnung ist dabei häufig von größerer Bedeutung als ihre Genauigkeit“ (SCHWEITZER & KÜPPER 1991, S. 187). Entscheidend im Sinne der Zielsetzung dieser Arbeit ist, dass sowohl Preisuntergrenzen als auch tatsächliche Stückkosten auf der gleichen Basis berechnet werden, um die Stückkostenentwicklung richtig in Bezug setzen zu können. Da die Anregungsfunktion des Monitoringmoduls im Vordergrund steht, ist der Verlauf der Stückkosten, unabhängig von der verwendeten Kalkulationsmethode, maßgeblich.

5.1.4.2 Ermittlung der Beschäftigungsabweichung

Entwicklungen bzw. Veränderungen des Produktionsprogramms bzw. der Stückzahlen schlagen sich in einer unterschiedlichen Nutzung des Produktionssystems nieder und wirken sich direkt auf die erzielbaren Stückkosten aus. Diese *Beschäftigungsabweichung* signalisiert, dass die gemäß der Kalkulation auf die Produkte verrechneten Fixkostenanteile nicht wie geplant über Verkaufserlöse in das Unternehmen zurückfließen (MÜLLER et al. 2003, S. 183). Sie entspricht den Leerkosten der Ist-Beschäftigung und wird als Maß für die nicht genutzte Kapazität interpretiert. Verbrauchs- bzw. Preisabweichungen werden nicht weiter untersucht, da keine Gegenmaßnahmen über Eingriffe in die Produktionsstruktur realisiert werden können.

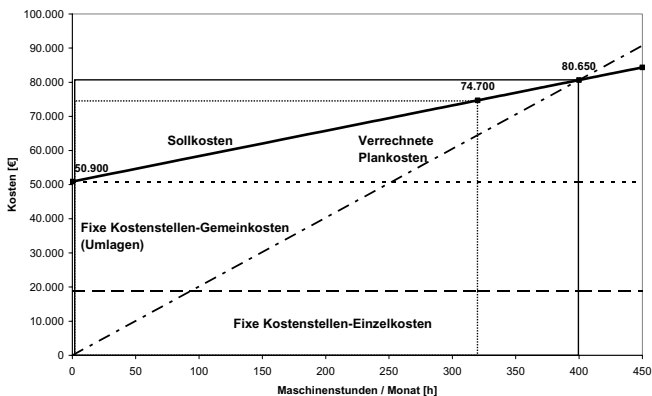


Abbildung 25: Beispiel einer Kostenfunktion

Die Auswirkungen von Auslastungsschwankungen werden in Abbildung 25 an dem Beispiel aus dem vorigen Abschnitt (Tabelle 2) verdeutlicht. Für die Beispielkalkulation wurde eine Planbeschäftigung von 400 h im Monat zur Produktion von 1000 Teilen zugrunde gelegt. Aufgrund rückläufiger Stückzahlen (800 Teile) sinkt die tatsächliche Maschinennutzung auf 320 h. Die monatlichen Plankosten der Kostenstelle belaufen sich bei unveränderten Fixkosten nun auf 74.700 €. Auslastungsbedingt erhöht sich der fixe Anteil des Maschinenstundensatzes auf 159,06 €, der proportionale Anteil bleibt unverändert (Tabelle 3). Aus dem Produkt der Differenz der fixen Maschinenstundensätze (31,81 €) und der tatsächlichen Beschäftigung (320 h/Monat) ergibt sich die monatliche Beschäftigungsabweichung, die in diesem Beispiel 10.180 € beträgt. Bezieht man die Beschäftigungsabweichung auf die Stückzahl (800 Teile), erhält man die kostenträgerbezogene Kostenentwicklung (hier eine Erhöhung um 12,73 €/Stück bzw. ca. 16 %).

	[h/Monat]	Kosten je Monat			Maschinenstundensatz		
		gesamt	fix	prop.	fix	prop.	gesamt
<i>Planbeschäftigung</i>	400	80.650	50.900	29.750	127,25	74,38	201,63
<i>Ist-Beschäftigung</i>	320	74.700	50.900	23.800	159,06	74,38	233,44

Tabelle 3: *Beispiel für Maschinenstundensatzänderung bei veränderter Auslastung*

5.2 Bewertung externer Einflussgrößen

Informationen in Bezug auf eine Anregung von Rekonfigurationsprozessen können nicht ohne eine Beurteilung externer Einflussgrößen abgeleitet werden. Nur über eine Beobachtung des Produktionsprogramms und des Stückzahlverlaufs im Besonderen lassen sich die beschriebenen Kennzahlen richtig interpretieren. Für die Auslösung von Rekonfigurationsprozessen lassen sich grundsätzlich zwei Fälle unterscheiden. Zum einen kann die Anpassung der Produktionsstruktur durch das Eintreten eines singulären Ereignisses (z.B. die Einführung neuer Produkte) bedingt werden. Auf der anderen Seite können unvorhergesehene Stückzahlentwicklungen bzw. Verschiebungen im Produktionsprogramm zu einem schleichenden Effizienzverlust des Produktionssystems führen, der eine Strukturkorrektur notwendig macht.

5.2.1 Singuläre Ereignisse als Auslöser für Rekonfigurationsprozesse

Unter einem singulären Ereignis wird das Auftreten unvorhergesehener, d.h. noch nicht in der Planung berücksichtigter Umstände verstanden, die einen direkten Einfluss auf die Produktionsstruktur haben. Beispiele dafür sind:

- Einführung/Wegfall von Produkten bzw. Varianten
- altersbedingter Ersatz von Betriebsmitteln
- Erweiterung/Umbau der Fabrikfläche
- Produktionsverlagerung
- Anpassung der Eigenleistung durch Veränderung der Zuliefererstruktur
- Technologiesprünge
- ...

Diese Vorkommnisse ziehen in der Regel Konsequenzen hinsichtlich der Anzahl, der Art und der Anordnung der Betriebsmittel nach sich. Die Unternehmensleitung muss auf diese Ereignisse reagieren, ohne dass eine Beurteilung der aktuellen Produktionseffizienz notwendig wäre. Die Reaktion führt ähnlich wie bei einer signifikanten Effizienzabnahme zu einer Anregung von Rekonfigurationsprozessen im Sinne der Aufgabenstellung. Da das Gestaltungsobjekt in beiden Fällen identisch ist, kann auch hier die in Kapitel 6 und 7 vorgeschlagene Vorgehensweise zur Planung und Bewertung der Strukturanpassung verwendet werden.

5.2.2 Entwicklung des Produktionsprogramms als Auslöser für Rekonfigurationsprozesse

Häufig wird ein Produktionssystem nach dem Eintreten singulärer Ereignisse (vgl. vorigen Abschnitt) in Abhängigkeit des aktuellen bzw. des prognostizierten Produktionsprogramms neu geplant und rekonfiguriert. Allerdings ist der Versuch einer Vorhersage der Stückzahlen im turbulenten Unternehmensumfeld nur selten erfolgreich. Aufgrund der Abweichungen zwischen prognostizierten und tatsächlich eintretenden Stückzahlen kommt es zu Ineffizienzen im Produktionssystem. Im Folgenden wird innerhalb des Produktionsprogramms lediglich die Stückzahlentwicklung weiter betrachtet, da eine Veränderung der Produktpalette als singuläres Ereignis angesehen werden kann, das in der Regel eine Überprüfung und gegebenenfalls eine Anpassung der Produktionsstruktur zur Folge hat.

Stückzahlentwicklungen haben einen direkten Einfluss auf die Belastung des Produktionssystems. Positive Entwicklungen können vereinzelt zu Engpässen und damit zu einer Verschlechterung der Liefertreue führen. Ein Absinken der Stückzahlen kann die Wirtschaftlichkeit der Produktion gefährden, da Minderauslastungen in einem Ansteigen der Stückkosten resultieren. Wichtig bei der Beobachtung der Stückzahlverläufe ist die Unterscheidung mittel- bis langfristiger Entwicklungen von kurzfristigen Schwankungen. So darf eine Strukturangepassung aufgrund des hohen Investitionsaufkommens nicht durch vorübergehende Unregelmäßigkeiten im Abrufverhalten des Kunden ausgelöst werden. Vielmehr ist eine Trendanalyse durchzuführen, die durch weitere Umfeldinformationen des Planers unterstützt wird. Vielfach lässt sich der weitere Stückzahlverlauf eines Produkts nach dessen Markteinführung sehr viel besser vorhersagen als zu Beginn der Planung.

5.3 Identifikation des Bedarfs nach Strukturadaption

Die im Rahmen des Monitoringmoduls angestrebte Identifikation des Bedarfs nach Strukturadaption beschränkt sich auf die stückzahlbedingte Notwendigkeit einer Restrukturierung der Produktion. Dabei kann aus einzelnen Abweichungen nicht auf Veränderungen im Produktionssystem geschlossen werden. Vielmehr muss die Entwicklung einer ganzen Zeitreihe betrachtet und analysiert werden.

Für die Analyse müssen die Stückkosten noch um die Preis- und Verbrauchsabweichungen bereinigt werden, um die tatsächliche Beschäftigungsabweichung zu erhalten. Nur die Beschäftigung wird durch Stückzahlschwankungen beeinflusst und ist daher die maßgebliche Bezugsgröße für die Beurteilung der auslastungsbedingten Kostenentwicklung.

Die zeitliche Entwicklung der Kennzahlen muss ebenso wie der Verlauf des Produktionsprogramms mit statistischen Verfahren analysiert werden. Dieser Vorgang wird auch als Regressionsanalyse bezeichnet. Bei bestehender Korrelation zwischen zwei Merkmalen wird eine funktionale Beziehung angenommen, die den realen Verlauf am nächsten, d.h. mit der geringsten Abweichung, abbildet. Mit Hilfe dieser Regressionsfunktion kann der weitere Verlauf berechnet bzw. prognostiziert werden.

Nach PFEIFER (1993, S. 233) sind mehr als 30 Verfahren zur Trenderkennung bekannt. Die gängigsten Verfahren sind gleitender Mittelwert, lineare Regressi-

on, quadratische Regression und Regression höheren Polynomgrades sowie exponentielle Regression (KETTNER et al. 1984, S. 48; AGGTELEKY 1990a, S. 246 ff; SCHWEITZER & KÜPPER 1991, S. 253). Der gleitende Mittelwert repräsentiert eine Folge von Mittelwerten, die aus Teilen einer Datenreihe (meist drei, fünf, sieben oder neun Datenpunkte) errechnet werden. Bei der Berechnung der Regressionsfunktion wird die durchschnittliche Abweichung der Funktionswerte von den Datenpunkten minimiert. Um die Funktionskoeffizienten zu bestimmen, wird diese Abweichung üblicherweise mit der Methode der kleinsten Quadrate, d.h. mit der mittleren quadrierten Differenz zwischen den Datenpunkten und den entsprechenden Funktionswerten, gemessen (PRESS et al. 1986, S. 499 ff.).

Jedes Verfahren ist in Abhängigkeit des Trendverlaufs unterschiedlich geeignet. Da ex ante die Trendverläufe nicht bekannt sind, kann keines der bekannten Testverfahren uneingeschränkt empfohlen werden (LOEPER 1995, S. 113). Der Einsatz eines geeigneten Verfahrens und die korrekte Interpretation der Ergebnisse aus Trendanalysen hängen zum einen von der Erfahrung des Planers und zum anderen von den ihm zur Verfügung stehenden Informationen ab. Unterliegt z.B. der Stückzahlverlauf saisonalen Schwankungen, ist die lineare Regression unzweckmäßig, da vorübergehende Abweichungen nicht dargestellt werden. Entscheidend ist, dass für die Analyse der Kennzahlenentwicklung und des Stückzahlverlaufs dieselbe Methode verwendet wird, um bei positiven oder negativen Korrelationen auf einen kausalen Zusammenhang schließen zu können.

Ausgangspunkt für die Identifikation des Bedarfs nach einer Strukturadaption ist die Überwachung der Kennzahlen. Entsprechend der leistungs- und kostenorientierten Sichtweise lassen sich zwei Fälle unterscheiden. Unterschreitet die Liefertreue eines bestimmten Produkts den zulässigen Wert, wird eine Trendanalyse eingeleitet. Analog wird bei der Überschreitung einer Stückkostengrenze verfahren. Lässt sich ein Trend feststellen, wird mit demselben Verfahren der Stückzahlverlauf untersucht. Lässt sich eine Korrelation nachweisen, d.h. besteht ein kausaler Zusammenhang zwischen Kennzahlenentwicklung und Stückzahlverlauf, werden die Ursachen unter Berücksichtigung der nutzungsorientierten Kennzahlen ermittelt (vgl. Abschnitt 5.1.3). Wichtige Informationen, die in diesem Zusammenhang gewonnen werden sollen, betreffen die Identifikation von Engpässen und Unterauslastungen. Die in dieser Phase ermittelten Optimierungspotenziale stellen Eingangsinformationen für die weitere Planung dar. Die in diesem Abschnitt beschriebene Vorgehensweise veranschaulicht Abbildung 26.

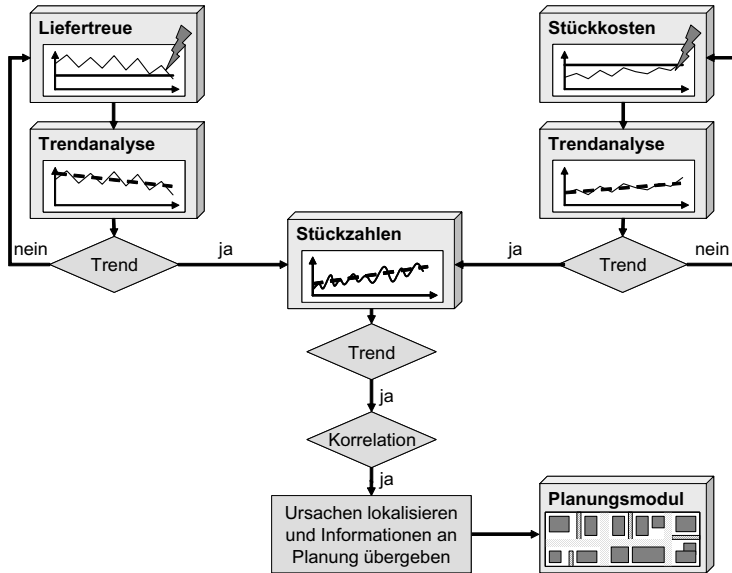


Abbildung 26: Ablauf bei der Identifikation von Restrukturierungsbedarfen

6 Konzeption des Planungsmoduls

Wie bereits erwähnt, erfolgt die Planung von Rekonfigurationsprozessen in zwei Schritten. Der erste Schritt dient ausgehend von den geänderten Rahmenbedingungen der Ermittlung einer optimierten Produktionsstruktur. Im zweiten Schritt wird die Migration von der aktuellen Struktur in die Sollstruktur geplant. Dementsprechend ist das Planungsmodul in die zwei Partialmodule Optimierung und Umsetzung gegliedert.

6.1 Optimierung der bestehenden Produktionsstruktur

Die Planung einer Rekonfiguration der Produktionsstruktur kann aus zwei Gründen angeregt werden. Zum einen führen singuläre Ereignisse (z.B. Erweiterung der Fabrikfläche) zu einer Überprüfung und gegebenenfalls zu einer Anpassung des Produktionssystems. Auf der anderen Seite kann eine durch Stückzahlentwicklungen induzierte Effizienzverschlechterung eine Strukturadaption erfordern (vgl. Abschnitt 5.2). Unabhängig davon erfolgt die Planung von Rekonfigurationsprozessen stets nach dem gleichen Prinzip. Dabei wird ein ganzheitlicher Planungsansatz verfolgt, um eine gewachsene, in der Regel suboptimale Struktur aufgrund isolierter Anpassungsmaßnahmen zu vermeiden. Das bedeutet, dass trotz konkret identifizierter Verbesserungspotenziale, wie z.B. die Reduktion der Kapazität in einem bestimmten Fertigungsbereich, die Erweiterung des Planungsproblems auf angrenzende Bereiche oder das gesamte Produktionssystem ermöglicht wird.

6.1.1 Bestimmung von Arbeitsplanalternativen

Den Ausgangspunkt der Planung bildet die Auswahl von Arbeitsplanalternativen. Ein Arbeitsplan „enthält Informationen über die Art, die technologische Reihenfolge der Aktionen eines jeden Auftrages/Teilauftrages, deren Zeitbedarf (Kapazitätsbedarf ohne Periodenzuordnung, gemessen in Zeiteinheiten) und die Art der benötigten Kapazitäten (Maschinen, Werkzeuge, Arbeitskräfte)“ (JOSWIG-KÜHL et al. 1988, S. 314). Häufig werden für jedes Produkt alternative Arbeitspläne im PPS-System hinterlegt, auf die im Rahmen einer Ablaufoptimierung situationsabhängig zurückgegriffen wird. Für die Optimierung der Produktionsstruktur müssen Arbeitspläne in Abhängigkeit der aktuellen Produktionsanforderungen ausgewählt werden. Da mit der Auswahl der Arbeitspläne auch Entscheidungen

über die verwendeten Betriebsmittel getroffen werden, müssen in dieser Phase bereits potenzielle Änderungen in der Betriebsmittelstruktur in Form von virtuellen Kapazitäten (neue Arbeitsplanalternative) berücksichtigt werden.

6.1.1.1 Darstellung von Arbeitsplanalternativen

Die für jedes Produkt hinterlegten Arbeitsplanalternativen werden zur Veranschaulichung mit Hilfe eines Netzplans dargestellt, dessen Elemente die zugeordneten Betriebsmittel repräsentieren (Abbildung 27). Jeder Pfad durch den Netzplan stellt einen möglichen Arbeitsplan für das Produkt dar. Unter Berücksichtigung der Informationen aus dem Monitoringmodul kann der Planer neue Betriebsmittel einplanen oder bestehende im Netzplan ersetzen.

Um die Komplexität bei einer hohen Anzahl an Betriebsmitteln zu reduzieren, werden die Elemente des Netzplans in zwei Kategorien unterteilt. Betriebsmittel, die aufgrund ihrer Spezifikationen und Funktionalität eine besondere Rolle im Produktionssystem einnehmen, werden einzeln berücksichtigt. Lassen sich Betriebsmitteln ähnliche Funktionsmerkmale zuordnen, werden sie zu Betriebsmitteltypen zusammengefasst und ihre Kapazitäten zu einem Kapazitätspool summiert.

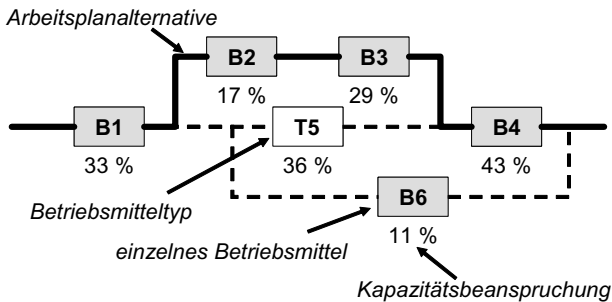


Abbildung 27: Darstellung von Arbeitsplanalternativen im Netzplan

Neben den Betriebsmitteln wird auch die beanspruchte Kapazität berücksichtigt. Aus den in den Arbeitsplänen hinterlegten Bearbeitungs- und Rüstzeiten sowie den geplanten Mengen ergibt sich die Belegungszeit des Betriebsmittels, die zur verfügbaren Kapazität ins Verhältnis gesetzt wird. So lassen sich durch die Addition der Kapazitätsbeanspruchung über einzelne Betriebsmittel bzw. Betriebsmitteltypen Unter- oder Überauslastungen identifizieren. Um bei der Arbeitsplan-

auswahl zusätzlich zur Kapazitätsauslastung auch qualitative Faktoren einbeziehen zu können, besteht für den Planer die Möglichkeit, Arbeitsplanalternativen für ein Produkt zu priorisieren. Ausschlaggebende Merkmale können z.B. einheitliche Taktzeiten, besondere Qualitätsanforderungen oder die Verfügbarkeit des Bedienpersonals sein. Eine hohe Priorität wird dabei durch eine niedrige Kennziffer ausgedrückt.

Nachdem sämtliche Arbeitsplanalternativen berücksichtigt sind, werden diese in eine Tabelle überführt und für die weitere Bewertung zur Verfügung gestellt (Abbildung 28). Die Betriebsmittel bzw. Betriebsmitteltypen werden spaltenweise erfasst. Jede Zeile der Tabelle entspricht einer Arbeitsplanalternative mit der zugehörigen Kapazitätsbeanspruchung und Priorisierung. Mit Hilfe der Tabelle lässt sich über entsprechende Sortier- und Eliminationsalgorithmen die Anzahl der für die weitere Planung zu berücksichtigenden Arbeitsplanalternativen reduzieren.

Arbeitsplanalternativen Produkt 1								
Nr.	B1	B2	B3	B4	T5	B6	B7	Prio.
1.1	33%	17%	29%	43%	0%	0%	0%	2
1.2	33%	0%	0%	43%	36%	0%	0%	3
1.3	33%	0%	0%	0%	0%	11%	0%	1

Arbeitsplanalternativen Produkt 2								
Nr.	B1	B2	B3	B4	T5	B6	B7	Prio.
2.1	32%	29%	78%	0%	25%	0%	24%	3
2.2	0%	29%	78%	48%	25%	0%	24%	4
2.3	32%	29%	0%	0%	0%	35%	0%	2
2.4	0%	29%	0%	48%	0%	35%	0%	1

⋮

Arbeitsplanalternativen Produkt n								
Nr.	B1	B2	B3	B4	T5	B6	B7	Prio.
n.1	0%	12%	0%	0%	9%	0%	8%	1
n.2	0%	12%	0%	0%	0%	15%	8%	2

Abbildung 28: Tabellarische Übersicht der Arbeitsplanalternativen

6.1.1.2 Auswahl von Arbeitsplänen

Vornehmliches Ziel bei der Auswahl von Arbeitsplänen ist eine harmonische Kapazitätsverteilung auf die Betriebsmittel, um Engpässe und Unterauslastungen zu vermeiden. Jedoch können unterschiedliche Kriterien zur Erreichung dieser Zielsetzung herangezogen werden. Daneben spielen weitere Faktoren, wie z.B. eine gleichmäßige Austaktung, eine Rolle. Somit unterliegt es dem Planer, die

6 Konzeption des Planungsmoduls

für ihn relevanten Kriterien auszuwählen und zu kombinieren, um zweckmäßige Arbeitsplankombinationen zu identifizieren. Unter einer Arbeitsplankombination ist die Menge der ausgewählten Arbeitsplanalternativen für jedes Produkt zu verstehen. Um geeignete Arbeitsplankombinationen über Sortier- und Eliminationsvorgänge herausfiltern zu können, müssen die Arbeitsplanalternativen in eine Kombinationsliste übertragen werden (Tabelle 4). Bei drei Produkten mit jeweils drei, vier und zwei Arbeitsplanalternativen ergeben sich in diesem Beispiel 24 Arbeitsplankombinationen. Die Kapazitätsbeanspruchungen für die Betriebsmittel sowie die Prioritätskennziffern werden dabei summiert.

Nr.	Produkt 1	Produkt 2	Produkt 3	B1	B2	B3	B4	T5	B6	B7	Prio.
1	1.1	2.1	3.1	65%	58%	107%	43%	34%	0%	32%	6
2	1.1	2.1	3.2	65%	58%	107%	43%	25%	15%	32%	7
3	1.1	2.2	3.1	33%	58%	107%	91%	34%	0%	32%	7
4	1.1	2.2	3.2	33%	58%	107%	91%	25%	15%	32%	8
5	1.1	2.3	3.1	65%	58%	29%	43%	9%	35%	8%	5
6	1.1	2.3	3.2	65%	58%	29%	43%	0%	50%	8%	6
⋮											
22	1.3	2.3	3.2	65%	41%	0%	0%	0%	61%	8%	5
23	1.3	2.4	3.1	33%	41%	0%	48%	9%	46%	8%	3
24	1.3	2.4	3.2	33%	41%	0%	48%	0%	61%	8%	4

Tabelle 4: Beispielhafter Auszug einer Arbeitsplankombinationsliste

Da die Arbeitsplankombinationen die Ausgangsdaten für die anschließende Layoutplanung darstellen, muss der Lösungsraum, d.h. die Anzahl der Arbeitsplankombinationen, auf ein sinnvolles Maß reduziert werden. Folgende Auswahlkriterien können dabei vom Planer berücksichtigt werden:

- **Priorisierte Arbeitspläne**

Nachdem die Arbeitsplanalternativen bereits bewertet wurden, kann die Kombinationsauswahl anhand der Prioritäten erfolgen. Eine niedrige Prioritätszahl deutet dabei auf eine hohe Anzahl von Arbeitsplänen hin, die bezüglich der einzelnen Produkte hohe Priorität genießen.

- **Kapazitätsüberschreitungen**

Arbeitsplankombinationen, bei denen die Kapazitätsbeanspruchung die zur Verfügung stehende Kapazität überschreitet, werden ausgeschlossen. Dieses Kriterium ist für den Fall zu wählen, wenn geplante Investitionen in Form von virtuellen Kapazitäten bzw. Betriebsmitteln bereits berücksichtigt wur-

den. Andernfalls kann das Kriterium als wichtiger Hinweis für eine notwendige Kapazitätserhöhung dienen.

▪ **Homogene Auslastung**

Bei diesem Kriterium werden Arbeitsplankombinationen ausgewählt, die eine möglichst homogene Auslastung der Betriebsmittel ermöglichen. Hauptziel ist dabei die Reduktion von Zwischenzeiten durch eine gleichmäßige Beanspruchung der Produktionsressourcen bzw. durch die Vermeidung von Engpässen.

▪ **Zusammenhängende Restkapazität**

Anhand dieses Kriteriums werden Arbeitsplankombinationen ausgesucht, die bei einem oder mehreren Betriebsmitteln eine große zusammenhängende Restkapazität aufzeigen. Damit lässt sich das Potenzial, weitere Aufträge erfolgreich zu integrieren, abschätzen. Für den Extremfall, dass keine Kapazität beansprucht wird, kann im Hinblick auf die Fixkostenstruktur die Abwicklung/Veräußerung des Betriebsmittels in Erwägung gezogen werden.

▪ **Kurze Durchlaufzeit**

Eine Verkürzung der Durchlaufzeit lässt sich erreichen, indem die Anzahl verschiedener Produkte auf einem Betriebsmittel reduziert wird. Mit der Auswahl der entsprechenden Arbeitsplankombinationen sinken die Rüst- und Wartezeiten und somit die Durchlaufzeiten.

Nr.	Produkt 1	Produkt 2	Produkt 3	B1	B2	B3	B4	T5	B6	B7	Prio.
1	1.1	2.1	3.1	65%	58%	107%	43%	34%	0%	32%	6
2	1.1	2.1	3.2	65%	58%	107%	43%	25%	15%	32%	7
3	1.1	2.2	3.1	33%	58%	107%	91%	34%	0%	32%	7
4	1.1	2.2	3.2	33%	58%	107%	91%	25%	15%	32%	8
22	1.3	2.3	3.2	65%	41%	0%	0%	0%	61%	8%	5
21	1.3	2.3	3.1	65%	41%	0%	0%	9%	46%	8%	4
14	1.2	2.3	3.2	65%	41%	0%	43%	36%	50%	8%	7
13	1.2	2.3	3.1	65%	41%	0%	43%	45%	35%	8%	6
24	1.3	2.4	3.2	33%	41%	0%	48%	0%	61%	8%	4
23	1.3	2.4	3.1	33%	41%	0%	48%	9%	46%	8%	3
16	1.2	2.4	3.2	33%	41%	0%	91%	36%	50%	8%	6
15	1.2	2.4	3.1	33%	41%	0%	91%	45%	35%	8%	5

Tabelle 5: *Beispiel einer Arbeitsplankombinationsauswahl anhand der Kriterien ‚Kapazitätsüberschreitung‘ und ‚zusammenhängende Restkapazität‘*

Ergebnis des Auswahlverfahrens (Tabelle 5) sind eine oder mehrere Arbeitsplankombinationen, mit deren Hilfe sich die Fixkostenstruktur basierend auf den erforderlichen Betriebsmitteln sowie den Materialflussbeziehungen ermitteln lassen. Letztere bilden die Eingangsdaten für die anschließende Layoutplanung.

6.1.2 Erzeugung von Layoutvarianten

Nach Auswahl der Arbeitsplankombinationen als Planungsgrundlage wird die Layoutplanung initiiert. Ziel ist die effiziente Anordnung der Betriebsmittel im Hallenlayout in Bezug auf die Materialflusskosten bzw. die Beanspruchung der Transportmittelkapazitäten. Dabei soll das von ROLLBERG (2001, S. 128) formulierte Dilemma, nach dem die realitätsnahe Modellierung des Planungsproblems und dessen Lösbarkeit im Widerspruch stehen, weitgehend aufgelöst werden.

6.1.2.1 Festlegung des Hallenlayouts

Der erste Schritt zur Realisierung wirklichkeitsnaher Lösungen ist die Berücksichtigung der Gegebenheiten in der Produktion. Dazu zählt in besonderem Maße das Hallenlayout, welches sich aufgrund der gebäudetechnischen Restriktionen

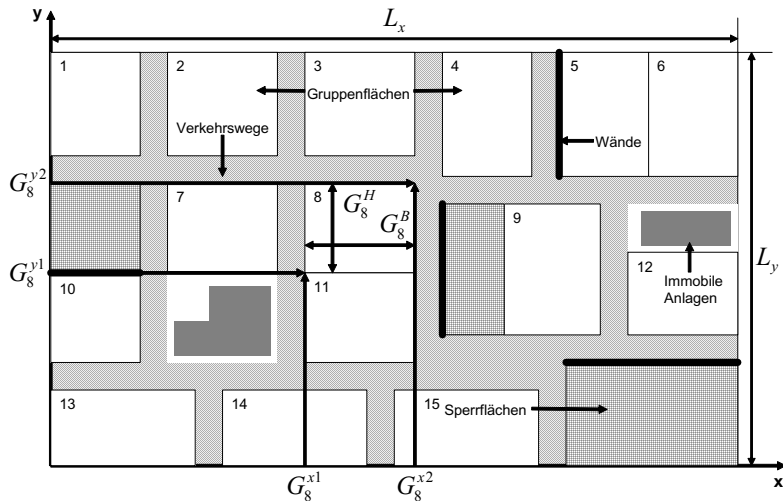


Abbildung 29: Beispiel eines Hallenlayouts

üblicherweise nur mit sehr hohem Aufwand verändern lässt. Durch eine möglichst detaillierte Abbildung des Hallenlayouts bei der Lösungssuche kann der Lösungsraum sinnvoll eingeschränkt und der Aufwand für die Anpassung an reale Gegebenheiten reduziert werden.

Das Hallenlayout wird als abgegrenzte Fläche betrachtet, für die ein zweidimensionales Koordinatensystem festgelegt wird (Abbildung 29, Notation s. S. 82 f.). Die Fläche kann in Abhängigkeit des zu beplanenden Objekts die gesamte Fabrikhalle darstellen oder einen Hallenbereich repräsentieren. Das Koordinatensystem dient zum einen der Bestimmung der Entfernungen zwischen unterschiedlichen Punkten in der Fabrikfläche und wird daher für die Bewertung durch die Zielfunktion benötigt. Zum anderen ist es für die exakte Positionierung der Betriebsmittel mit Hilfe des genetischen Algorithmus notwendig.

In dieser Phase werden räumliche Restriktionen wie Sperrflächen oder Hallenwände definiert, um den Lösungsraum für eine wirklichkeitsnahe Anordnung der Betriebsmittel entsprechend den realen Gegebenheiten einzuschränken. Da die Führung der Verkehrswege häufig durch das Hallenraster vorgegeben wird und darüber hinaus an rechtliche Bestimmungen (z.B. Fluchtwege) gebunden ist, werden diese ebenfalls im Vorfeld festgelegt. Sollten dennoch Freiräume bei der Anordnung von Verkehrswegen bestehen, können Varianten des Hallenlayouts zur Erzeugung weiterer Layoutalternativen verwendet werden. Allerdings sollte in diesem Fall der erzielbare Nutzen im Sinne einer effizienten Planung sorgfältig geprüft werden.

In nahezu jeder Fertigung befinden sich Anlagen (z.B. Lackiererei, Wärmebehandlung, Pressen), deren Verlagerung aufgrund des zeitlichen und finanziellen Aufwands sowie der Anforderungen an die Fundamentierung nur in Ausnahmefällen sinnvoll ist. Diese Anlagen gelten als immobil und werden daher mit ihrer aktuellen Position in das Hallenlayout eingetragen. Sie werden bei der Anordnungsoptimierung nicht weiter berücksichtigt. Allerdings sind die zugehörigen Materialflussbeziehungen weiterhin Teil der Zielfunktion. Die verbleibenden Flächen (Gruppenflächen) stellen den Lösungsraum für die Anordnung der mobilen Betriebsmittel dar und werden in Rechtecke ähnlicher Größe aufgeteilt. Häufig wird diese Einteilung durch das Verkehrswegeraster bereits vorgegeben.

Innerhalb der Freiflächen werden Betriebsmittelgruppen angeordnet (vgl. Abschnitt 6.1.2.3). Die Position eines einzelnen Betriebsmittels wird relativ zur linken unteren Ecke der zugeordneten Gruppenfläche angegeben (Abbildung 30).

6 Konzeption des Planungsmoduls

Die Koordinaten des Materialein- und -ausgangs beziehen sich auf die linke untere Ecke des Betriebsmittels.

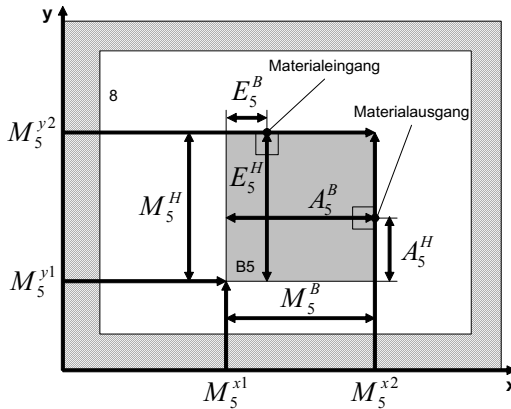


Abbildung 30: Positionierung eines Betriebsmittels im Layout

Die im Weiteren verwendete Notation ist der folgenden Übersicht zu entnehmen.

L_x, L_y	Maße der Layoutfläche
j, k	Gruppenflächenindizes
p, q	Maschinengruppenindizes
v, w	Maschinenindizes
G_j^B, G_j^H	Breite bzw. Höhe der Gruppenfläche j
G_j^{x1}, G_j^{y1}	absolute Position der linken bzw. unteren Kante der Gruppenfläche j im Layout
G_j^{x2}, G_j^{y2}	absolute Position der rechten bzw. oberen Kante der Gruppenfläche j im Layout
M_v^B, M_v^H	Breite bzw. Höhe der Maschine v
M_v^{x1}, M_v^{y1}	absolute Position der linken bzw. unteren Kante der Maschine v in der Gruppenfläche
M_v^{x2}, M_v^{y2}	absolute Position der rechten bzw. oberen Kante der Maschine v in der Gruppenfläche
E_v^B, E_v^H	relative Position des Materialeingangs, gemessen von der linken unteren Ecke der Maschine v
E_v^x, E_v^y	absolute Position des Materialeingangs von Maschine v in der Gruppenfläche
A_v^B, A_v^H	relative Position des Materialausgangs, gemessen von der linken unteren Ecke der Maschine v

A_v^x, A_v^y absolute Position des Materialausgangs von Maschine v in der Gruppenfläche

6.1.2.2 Bildung von Betriebsmittelgruppen

Die Aufstellflächen der Betriebsmittel wurden bei der Erstellung des Hallenlayouts in Gruppenflächen eingeteilt (vgl. Abschnitt 6.1.2.1). Unter Berücksichtigung dieser Gruppenflächen werden nun die Betriebsmittel ebenfalls in Gruppen eingeteilt. Dies erfolgt unter Beachtung folgender Restriktionen:

- Die Anzahl der Gruppenflächen muss mindestens der Anzahl an Betriebsmittelgruppen entsprechen.
- Die Anzahl an Betriebsmitteln in einer Gruppe ist frei wählbar, solange
- die von der Betriebsmittelgruppe benötigte Grundfläche kleiner als die kleinste Gruppenfläche ist. Dadurch wird sichergestellt, dass alle Betriebsmittelgruppen auf jeder Gruppenfläche angeordnet werden können.

Ziel der Gruppenbildung ist die Minimierung der Materialflüsse zwischen den Gruppen. Die wesentlichen Materialbewegungen finden so innerhalb einer Gruppe statt und begünstigen auf diese Weise eine direkte Verkettung der Betriebsmittel. Gleichzeitig wird der Einfluss der Gruppenabstände auf die Zielerreichung reduziert. Damit werden Schwankungen der Lösungsqualität einzelner Layoutvarianten gesenkt und mit Hinblick auf den heuristischen Lösungsansatz die Gefahr einer weit unterhalb des Optimums liegenden Lösung verringert.

Es ist anzumerken, dass sich aufgrund der Ausrichtung am Materialfluss nicht zwangsläufig eine produktorientierte Produktionsstruktur entwickelt. Um dem Planer dennoch die Möglichkeit zu geben, bestimmte Fertigungsprinzipien (z.B. Werkstattfertigung mit Mehrmaschinenbedienung) umzusetzen, kann er im ersten Schritt selber Betriebsmittelgruppen festlegen. Auch eine kombinierte Herangehensweise aus manueller und automatisierter Gruppenbildung ist denkbar.

Als Bewertungskriterium werden neben dem Materialfluss, der aus der Arbeitsplatzkombination über die Materialflussmatrix abgeleitet werden kann, auch qualitative Einflüsse erfasst. Dazu wird in Anlehnung an SHANG (1993) eine zweite Matrix erstellt, mit deren Hilfe die Attraktivität der relativen Anordnung zweier Maschinen beurteilt werden kann. Zu den Einflussfaktoren zählen beispielsweise Lärm- und Temperaturentwicklung, Sicherheitsaspekte, Verkettungsmöglichkeiten, Maschinendynamik usw. Dieses Vorgehen ermöglicht zum einen die quanti-

6 Konzeption des Planungsmoduls

fizierte Berücksichtigung qualitativer Einflüsse. Zum anderen erleichtert die Einbindung in die Zielfunktion die Berücksichtigung von Restriktionen, wie z.B. das Verbot einer nachbarschaftlichen Anordnung von Betriebsmitteln, die sonst aufwändig über Nebenbedingungen in die mathematische Formulierung eingebunden werden müssen und teilweise zur Unlösbarkeit des Planungsproblems führen.

Zum Aufstellen dieser Matrix werden die Betriebsmittel analog zur Materialflussmatrix paarweise gegenübergestellt und die Attraktivität einer nachbarschaftlichen Anordnung mit Hilfe eines Punktesystems bewertet (Tabelle 6).

-1	Nachbarschaft der Maschinen auf keinen Fall erwünscht
-0,5	Nachbarschaft der Maschinen vermeiden
0	Anordnung der Maschinen egal
0,5	Nachbarschaft der Maschinen wünschenswert
1	Nachbarschaft der Maschinen verlangt

Tabelle 6: Punktesystem zur Bewertung der Attraktivität nachbarschaftlicher Betriebsmittelanordnung

Um die Bewertungsmatrix an die Materialflussmatrix anzupassen, wird der Skalierungsfaktor α eingeführt. Die Höhe des Faktors orientiert sich am größten Wert in der Materialflussmatrix und kann je nach Gewichtung der qualitativen Bewertungskriterien durch den Planer variiert werden. Nachdem die Bewertungsmatrix mit dem Faktor α multipliziert wurde, wird sie zur Materialflussmatrix hinzuaddiert (Abbildung 31). Anhand dieser erweiterten Materialflussmatrix wird im Folgenden die Zielerreichung bei der Gruppenbildung bewertet.

Zur Gruppierung der Maschinen wird der Ansatz von HARHALAKIS et al. (1990) gewählt. Dieser gliedert sich in zwei Schritte:

- **Gruppenbildungsfunktion**

Zu Beginn wird jedes Betriebsmittel als eine Gruppe betrachtet. In jedem nun folgenden Schritt des Algorithmus werden die möglichen Beziehungen zwischen allen Gruppen anhand der erweiterten Materialflussmatrix berechnet und die Betriebsmittel mit der größten Beziehung unter Berücksichtigung der Restriktionen zu Gruppen zusammengefasst. Anschließend wird die Matrix aktualisiert. Dabei entsprechen die Materialflussbeziehungen zwischen einer

unveränderten Gruppe (Betriebsmittel) und einer zusammengefassten Gruppe der Summe der vorherigen Beziehungen. Das Vorgehen wird so lange fortgeführt, bis keine Gruppierung mehr möglich ist oder keine Materialflussbeziehungen mehr zwischen den Gruppen bestehen. Letzteres entspräche der optimalen Gruppeneinteilung.

▪ **Lokale Verbesserungsfunktion**

Bei dieser Funktion wird auf der Basis einer Gruppenzuordnung die bestehende Lösung verbessert. Hierzu wird jedes Betriebsmittel aus der Gruppe herausgegriffen und als eigenständige Einheit betrachtet. Dieses Betriebsmittel wird daraufhin der Gruppe zugeordnet, zu der die größte Materialflussbeziehung besteht.

Durch Variationen der Restriktionen, vornehmlich der Gruppenflächengröße, ist es möglich, unterschiedliche Ausgangslösungen für die weitere Planung zu erzeugen. Durch die Beschränkung der von den Betriebsmittelgruppen benötigten Fläche auf die kleinste Gruppenfläche wird eine vollständige Zuordnungsmöglichkeit gewährleistet. Wichtig ist in diesem Zusammenhang eine gleichmäßige Einteilung der Gruppenflächen, um Leerflächen zu vermeiden.

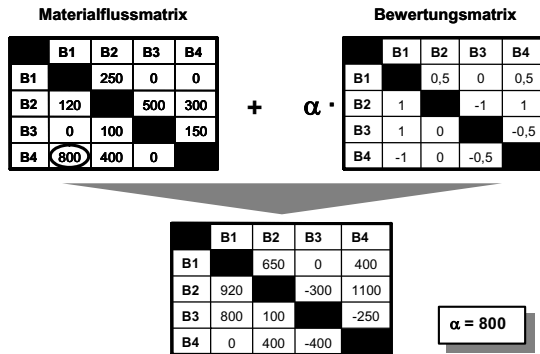


Abbildung 31: Erweiterte Materialflussmatrix

6.1.2.3 Zuordnung der Betriebsmittelgruppen zum Hallenlayout

Nachdem die Betriebsmittelgruppen gebildet wurden, wird für die eigentliche Layoutplanung sowohl ein quadratisches Zuordnungsproblem formuliert als auch ein gemischt-ganzzahliges Programm gewählt. Die zu Gruppen zusammenge-

fasten Betriebsmittel werden mit der quadratischen Zuordnung den im Hallenlayout festgelegten Flächen (Gruppenflächen) zugewiesen. Im Anschluss werden mit Hilfe des gemischt-ganzzahligen Programms die Betriebsmittel innerhalb einer Gruppe auf der zugeordneten Fläche angeordnet (vgl. Abschnitt 6.1.2.4). Aus diesem Grund sind zwei unterschiedliche Zielfunktionen ((5) und (9)) für die Lösung mittels genetischer Algorithmen notwendig.

Bei der Zuordnung der Betriebsmittelgruppen zum Hallenlayout hängt die Zielfunktion von zwei Variablen ab:

- **Transportwege**

Die Transportwege geben die Entfernungen zwischen den Betriebsmitteln wieder und sind eine Nebenbedingung der Zielfunktion, die es zu minimieren gilt. Die Entfernung wird bei der Zuordnung der Gruppen zwischen den geometrischen Mittelpunkten der Gruppenflächen entlang der Verkehrswege gemessen. Somit wird zwar kein exakter Transportweg bestimmt, die Messung ist jedoch für die Anordnung der Gruppen hinreichend genau (Abbildung 32).

- **Materialflussmatrix**

Die Transportmengen sind durch die Materialflussmatrix basierend auf der Arbeitsplankombination gegeben. Um qualitative Faktoren zu berücksichtigen, wurde diese Matrix um weitere Bewertungsgrößen erweitert. Da in dieser Phase lediglich die Zuordnung von Betriebsmittelgruppen erfolgt, werden die Betriebsmittel einer Gruppe zur Vereinfachung zu einem Betriebsmittel aggregiert. Dadurch lassen sich die Einträge in der erweiterten Materialflussmatrix reduzieren. Die Transporte innerhalb einer Gruppe bleiben unberücksichtigt, während die Transporte zu anderen Gruppen summiert werden. Die reduzierte Materialflussmatrix stellt die zweite Nebenbedingung der Zielfunktion dar.

Die Nebenbedingungen werden in der Zielfunktion zusammengeführt. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen wurde hier bewusst auf die Bewertung der Transportkosten verzichtet. Da diese abhängig von der Auslastung der Transportmittel sind, ist eine korrekte Bestimmung an dieser Stelle nicht möglich.

Aufgrund der unter Umständen abweichenden Anzahl an Betriebsmittelgruppen und Gruppenflächen sowie der fixierten Anordnung immobiler Anlagen wird die Zielfunktion von KOOPMANS & BECKMANN (1957, S. 63) in Anlehnung an BOGATZKI (1998, S. 41) erweitert. Dies ist notwendig, da die fixierten Maschinen außerhalb der Gruppenflächen positioniert sind und mit dem herkömmlichen

Algorithmus nicht erfasst werden. Die (gegebenenfalls) niedrigere Anzahl an Betriebsmittelgruppen führt dazu, dass Gruppenflächen teilweise nicht belegt werden. Auch dies ist bei den Restriktionen zu beachten.

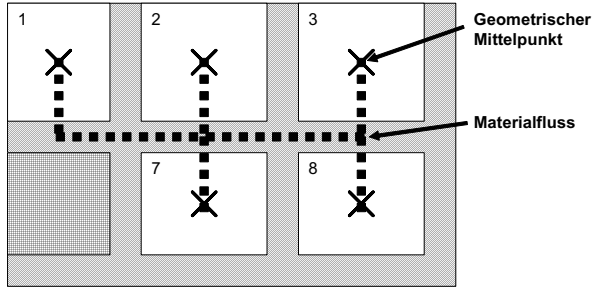


Abbildung 32: Entfernungsmessung bei der Gruppenzuordnung

Um doppelte Zuordnungen zu vermeiden, werden folgende Restriktionen formuliert. Restriktion (6) stellt sicher, dass jede freie Gruppenfläche nur von einer Betriebsmittelgruppe belegt wird. Restriktion (7) gewährleistet, dass jede Maschinengruppe nur einem Standort zugewiesen wird. Insgesamt ergibt sich somit folgende Zielfunktion (5) des Gruppenzuordnungsalgorithmus:

$$\min \left(\sum_{q=1}^n \sum_{j=1}^g \sum_{v^{fix}=1}^{m^{fix}} f_{qv^{fix}}^{fix} d_{jv^{fix}}^{fix} x_{qj} + \sum_{q=1}^{n-1} \sum_{i=q+1}^n \sum_{j=1}^g \sum_{k=1}^g f_{pq} d_{jk} x_{pj} x_{kq} \right) \quad (5)$$

$$\sum_{p=1}^n x_{pj} \leq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^g x_{pj} = 1 \quad (7)$$

$$\forall x_{pj} \in \{0, 1\}, \forall p \in \{1, 2, \dots, n\}, \forall j \in \{1, 2, \dots, g\}, \forall q < p, \forall k \neq j$$

$$x_{pj} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Maschinengruppe } p \text{ Gruppenfläche } j \text{ zugeordnet wird,} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

- g Anzahl Gruppenflächen
- m Anzahl Maschinen
- n Anzahl Maschinengruppen
- v^{fix} Index der fixierten Maschinen
- m^{fix} Anzahl fixierter Maschinen
- f_{vw} Transportbeziehung zwischen den Maschinen v und w

6 Konzeption des Planungsmoduls

f_{pq}	Transportbeziehung zwischen den Maschinengruppen p und q
f_{qv}^{fix}	Transportbeziehung zwischen der neu angeordneten Maschinengruppe q und der im Vorfeld fixierten Maschinen v^{fix}
d_{jk}	Transportweg zwischen Gruppenfläche j und Gruppenfläche k
d_{jv}^{fix}	Transportweg zwischen Gruppenfläche j und der fixierten Maschine v^{fix}

Eine detaillierte Beschreibung der Funktionsweise eines genetischen Algorithmus kann Abschnitt 3.2.2.8 bzw. Abschnitt 11.2.6 im Anhang entnommen werden. Abweichend von DUNKER et al. (2003) muss eine andere Codierung der Gene vorgenommen werden. Das i -te Individuum in der Generation γ ist dann gekennzeichnet durch:

$$I_i^{(\gamma)} = (p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_g) \quad (8)$$

$I_i^{(\gamma)}$	i -tes Individuum in der Generation γ
p_j	Zuordnung der Maschinengruppe i zur Gruppenfläche j

Dies entspricht der Zuordnung von Betriebsmittelgruppen und Gruppenflächen, d.h. der Eintrag repräsentiert die Nummer der Betriebsmittelgruppe, die Position im Individuum die der Gruppenfläche. Beispielsweise weist der Eintrag ‚3‘ an der vierten Stelle des Individuums auf die Zuordnung der Betriebsmittelgruppe 3 zu Gruppenfläche 4 hin. Eine ‚0‘ steht für eine nicht belegte Gruppenfläche. Jeder Wert außer 0 darf aufgrund der eindeutigen Zuordnung nur einmal vorkommen.

Im Folgenden werden die verwendeten Operatoren Selektion, Kreuzung und Mutation erläutert:

▪ Selektion

Dieser genetische Operator wird als explizite Selektion nach dem *Elite-Verfahren* implementiert (HEISTERMANN 1994, S. 22 ff.). Dabei werden Individuen mit geringer Fitness gesucht und aussortiert. Durch die Beschränkung auf die besten Individuen kann es zu einem Dominanzeffekt kommen, der schließlich zu einer frühzeitigen Stagnation des Evolutionsprozesses führt (SCHÖNEBURG et al. 1994, S. 206 f.). Um dies zu verhindern, wird ein Teil der Auswahl durch Individuen schlechterer Qualität (Fitness) ersetzt. Die Konvergenz des Evolutionsprozesses richtet sich nach dem Anteil der ausge-

wählten Individuen an der gesamten Population (ca. 10 % als Richtwert) und muss unter Umständen variiert werden.

▪ **Kreuzung**

Die Kreuzung zweier Individuen erfolgt nach dem *order crossover*-Verfahren (SCHÖNEBURG et al. 1994, S. 274), wobei jedes Individuum Gensequenzen beider Eltern übernimmt (Abbildung 33). Das zu kreuzende Genintervall wird mittels zweier zufällig ausgewählter Positionen im Elternchromosom (Individuum) bestimmt ($I_1^{(1)}, I_2^{(1)}$). Die Länge des Intervalls richtet sich nach der Anzahl der Gene. Es dürfen keine identischen Gene innerhalb der beiden ausgewählten Intervalle liegen, da sonst keine gültige Lösung erzeugt wird. Anschließend werden die Gene im Intervall bei dem jeweiligen anderen Elternteil als Lücke markiert ($I_1^{(1*)}, I_2^{(1*)}$). Befindet sich eine der mehrfach vorkommenden Nullen im Intervall, wird die erste Null beim anderen Elternteil ausgewählt. Die Population wird durch die Neuordnung der Gene erzeugt. Dazu werden die Gene des ausgewählten Intervalls gefolgt von den Lücken eingereiht und die restlichen Gene angehängt ($I_1^{(1**)}, I_2^{(1**)}$). Die Lücken werden zum Schluss mit dem Genintervall des anderen Elternteils ersetzt ($I_1^{(2)}, I_2^{(2)}$).

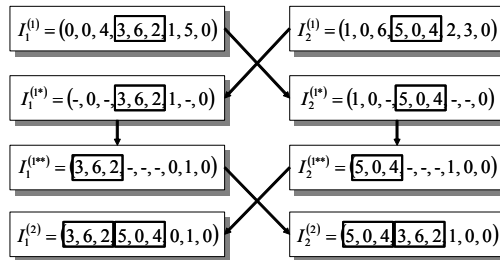


Abbildung 33: Kreuzung von Individuen nach dem order crossover-Verfahren

▪ **Mutation**

Bei der Mutation werden zufällig zwei Positionen (im Beispiel $p_1=3$ und $p_2=6$, Abbildung 34) innerhalb eines Individuums bestimmt. Nach dem Ausschneiden des Gens an der Position p_1 werden allen nachfolgenden Gene bis einschließlich Position p_2 nach links verschoben. Abschließend wird das herausgeschnittene Gen in die Lücke eingefügt (SCHÖNEBURG et al. 1994, S. 277 f.).

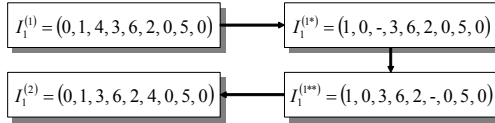


Abbildung 34: Mutation eines Individuums

6.1.2.4 Optimierung der Betriebsmittelanordnung

Nachdem die Betriebsmittelgruppen jeweils einer Gruppenfläche zugeordnet sind, werden nun die Betriebsmittel innerhalb einer Gruppe exakt positioniert. Auch hier wird ein genetischer Algorithmus verwendet, um das an KIM & KIM (2000) angelehnte gemischt-ganzzahlige Modell zu lösen.

Da bei der genauen Anordnung der Betriebsmittel auch die Transportwege exakt bestimmt werden müssen, wird die entsprechende Nebenbedingung der Zielfunktion aus dem vorigen Abschnitt erweitert. Damit lassen sich im Sinne einer realitätsnahen Lösungssuche Materialein- und -ausgänge sowie unterschiedliche Orientierungen berücksichtigen. Die erweiterte Materialflussmatrix kann mit der Einschränkung übernommen werden, dass keine Aggregation von Betriebsmitteln einer Gruppe erfolgt.

Bei der Bestimmung der Transportwege sind zwei Fälle zu unterscheiden (Abbildung 35). Innerhalb einer Gruppe wird der Transportweg zwischen den Betriebsmitteln als direkte Verbindung von Materialausgang zu Materialeingang gemessen. Dies ist zulässig, da auf kurze Distanzen Abweichungen bei der Wegführung nur einen geringen Einfluss haben. Beim Materialfluss zwischen Betriebsmitteln, die nicht derselben Gruppe angehören, ist der Transport an die Verkehrswege gebunden. Daher wird die Entfernung rechtwinklig entlang der Verkehrswege gemessen.

Zur Berechnung der rechtwinkligen Transportwege wird der heuristische A*-Algorithmus verwendet (STEINKE 2003, S. 687 ff; REINEKE 2004). Dieser Algorithmus dient zur Berechnung des kürzesten Pfades zwischen zwei Punkten eines Graphen und wird hauptsächlich in der Routenplanung eingesetzt. Die Kreuzungen von Verkehrswegen legen die Knotenpunkte fest. Mit Hilfe einer Schätzfunktion (z.B. euklidischer Abstand) wird für jeden Knotenpunkt des Graphen der zu erwartende Abstand zum Endpunkt bestimmt. Dadurch ergibt sich eine zielgerichtete Suche in Richtung des Endpunkts. Eine ausführliche Beschreibung des Algorithmus findet sich im Anhang unter Abschnitt 11.3.

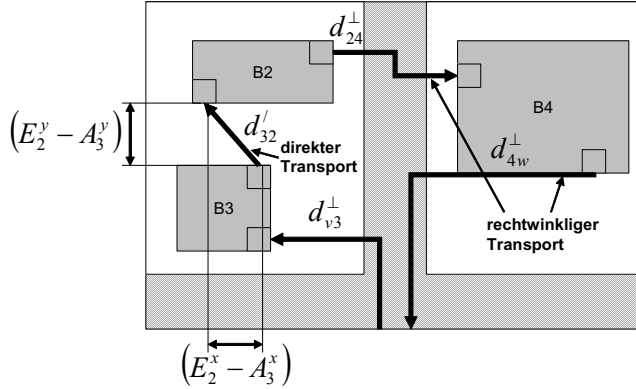


Abbildung 35: Exakte Entfernungsmessung zwischen Betriebsmitteln unterschiedlicher Gruppen

Für die Anordnung werden die Restriktionen in Anlehnung an KIM & KIM (2000) formuliert. Zur Lösung des gemischt-ganzzahligen Programms wird wiederum ein genetischer Algorithmus verwendet. Als Zielfunktion (Minimierung des Materialflusses) ergibt sich

$$\min \sum_{v=1}^m \sum_{w=1}^m f_{vw} d_{vw} \quad (9)$$

mit den Restriktionen:

$$d_{vw} = e_{vw} d'_{vw} + (1 - e_{vw}) d_{vw}^\perp, \quad e_{vw} \in \{0, 1\} \quad (10)$$

$$d'_{vw} = \sqrt{(A_v^x - E_w^x)^2 + (A_v^y - E_w^y)^2} \quad (11)$$

$$u_v^1 + u_v^2 + u_v^3 + u_v^4 = 1, \quad u_v^1, u_v^2, u_v^3, u_v^4 \in \{0, 1\} \quad (12)$$

$$M_v^{x2} = M_v^{x1} + (u_v^1 + u_v^3) M_v^B + (u_v^2 + u_v^4) M_v^H \quad (13)$$

$$M_v^{y2} = M_v^{y1} + (u_v^1 + u_v^3) M_v^H + (u_v^2 + u_v^4) M_v^B \quad (14)$$

$$(M_v^{x2} \leq M_w^{x1}) \wedge (M_v^{y2} \leq M_w^{y1}) \quad (15)$$

$$E_v^x = M_v^{x1} + E_v^B u_v^1 + E_v^H u_v^2 + (M_v^B - E_v^B) u_v^3 + (M_v^H - E_v^H) u_v^4 \quad (16)$$

$$A_v^x = M_v^{x1} + A_v^B u_v^1 + A_v^H u_v^2 + (M_v^B - A_v^B) u_v^3 + (M_v^H - A_v^H) u_v^4 \quad (17)$$

$$E_v^y = M_v^{y1} + E_v^H u_v^1 + (M_v^B - E_v^B) u_v^2 + (M_v^H - E_v^H) u_v^3 + E_v^B u_v^4 \quad (18)$$

6 Konzeption des Planungsmoduls

$$A_v^y = M_v^{y1} + A_v^H u_v^1 + (M_v^B - A_v^B) u_v^2 + (M_v^H - A_v^H) u_v^3 + A_v^B u_v^4 \quad (19)$$

$$M_v^{x2} \leq G_j^B \quad (20)$$

$$M_v^{y2} \leq G_j^H \quad (21)$$

$$M_h^{x1}, M_h^{y1}, M_h^{x2}, M_h^{y2}, E_h^x, E_h^y, A_h^x, A_h^y \geq 0 \quad (22)$$

- u_v^1 = 1, wenn das Betriebsmittel in der Basisausrichtung ist, sonst 0
 u_v^2 = 1, wenn das Betriebsmittel um 90° im Uhrzeigersinn zur Basisausrichtung gedreht wurde, sonst 0
 u_v^3 = 1, wenn das Betriebsmittel um 180° im Uhrzeigersinn zur Basisausrichtung gedreht wurde, sonst 0
 u_v^4 = 1, wenn das Betriebsmittel um 270° im Uhrzeigersinn zur Basisausrichtung gedreht wurde, sonst 0
 e_{vw} = 1, wenn Betriebsmittel v und w in einer Gruppe, sonst 0

Restriktion (10) unterscheidet die Art der Messung von Transportwegen (direkt/rechtwinklig). Restriktion (11) berechnet den direkten Transportweg zwischen den Materialaus- und -eingängen zweier Betriebsmittel. Die Ausrichtung des Betriebsmittels wird in 90°-Schritten durch Restriktion (12) festgelegt. Die Verschiebung der rechten und oberen Grenze der Betriebsmittelfläche aufgrund der Ausrichtung wird in den Restriktionen (13) und (14) erfasst. Restriktion (15) verhindert eine Überlappung zweier Betriebsmittel. Zur Beachtung der Materialein- und -ausgänge in Abhängigkeit der Betriebsmittelausrichtung werden Restriktionen (16) bis (19) formuliert. Restriktionen (20) bis (22) gewährleisten, dass Betriebsmittel innerhalb der zugeordneten Gruppenfläche angeordnet werden.

Bei der Codierung müssen alle Variablen, die durch den genetischen Algorithmus verändert werden sollen, durch ein eigenes Chromosom abgebildet werden. Dies sind im Einzelnen:

- Die x- und y-Koordinaten der linken unteren Ecke von Betriebsmitteln einer Gruppe M_v^{x1} und M_v^{y1} . Die Gene dieser beiden Chromosome nehmen Werte zwischen G_j^{x1} und G_j^{x2} bzw. G_j^{y1} und G_j^{y2} an.
- Die Ausrichtungen der Betriebsmittel $(u_v^1, u_v^2, u_v^3, u_v^4)$ werden ersetzt durch die Variable u_v (Tabelle 7). Somit kann die Codierung um drei Variablen reduziert werden.

u_v	= 1, wenn Betriebsmittel in Basisausrichtung (u_h^1)
u_v	= 2, wenn Betriebsmittel um 90° im Uhrzeigersinn zur Basisausrichtung gedreht wurde (u_h^2)
u_v	= 3, wenn Betriebsmittel um 180° im Uhrzeigersinn zur Basisausrichtung gedreht wurde (u_h^3)
u_v	= 4, wenn Betriebsmittel um 270° im Uhrzeigersinn zur Basisausrichtung gedreht wurde (u_h^4)

Tabelle 7: Definition der Variable u_v zur Reduzierung des genetischen Codes

Insgesamt ergibt sich somit folgende Notation des i -ten Individuums der Gruppe j aus der Generation γ :

$$(I_i^{(\gamma)})_j = ((M_v^{x1}, \dots), (M_v^{y1}, \dots), (u_v, \dots))_j \quad (23)$$

Da im Vergleich zu den genetischen Operatoren in Abschnitt 6.1.2.3 die Einmaligkeit eines Gens im Individuum nicht gefordert ist, werden die Gene in einen Binärkode umgewandelt. Damit lassen sich die genetischen Operationen bei gleichzeitig reduzierter Speichernutzung beschleunigen:

- **Selektion**

Der genetische Operator für die Selektion entspricht dem Algorithmus aus Abschnitt 6.1.2.3.

- **Kreuzung**

Für die Kreuzung zweier Individuen wird zufällig eine Position innerhalb der beiden Elternchromosome bestimmt. Die Nachkommen bilden sich aus dem vorderen Teil der Gensequenz des ersten und dem hinteren Teil des zweiten Elternchromosoms.

- **Mutation**

Bei der Mutation werden zufällig eine oder mehrere Positionen eines Chromosoms ausgewählt und der entsprechende Binärwert verändert ($0 \rightarrow 1$ bzw. $1 \rightarrow 0$).

Die so ermittelten Layoutvarianten bilden gemeinsam mit den ausgewählten Arbeitsplankombinationen und dem Produktionsprogramm szenario die Eingangsinformationen für die anschließende Simulation.

6.1.3 Anbindung an die Simulation

Die Kosten des innerbetrieblichen Warenflusses machen häufig einen Großteil der gesamten Logistikkosten aus (COSTEN 1995, S. 592; WOLL 1996, S. 447). Aufgrund der Zeitabhängigkeiten bei logistischen Prozessen ist eine statische Ermittlung der Nutzung von Logistikressourcen mittels Koeffizienten des Zeitverbrauchs in der Regel fehlerbehaftet. Gleichzeitig ergeben sich unzulässige Proportionalisierungen der Logistikkosten. Die Anbindung des Planungssystems an eine Simulation ist daher notwendig, um dynamische Zusammenhänge modellieren zu können.

Eine statische Abschätzung der Ressourcennutzung im Rahmen der Kapazitätsplanung lässt sich zu Beginn der Planung nicht vermeiden (vgl. Abschnitt 6.1.1). Hinzu kommen mögliche Anpassungen der Steuerungsstrategie und die Verwendung alternativer Maschinenbelegungen nach Prioritätsregeln in flexiblen Produktionssystemen, so dass die tatsächlich beanspruchten Kapazitäten stark von der geplanten Ressourcenauslastung abweichen können. Dadurch werden zum Teil Korrekturen bei der Identifikation notwendiger Potenzialfaktoren notwendig. Speziell der Einsatz von Logistikressourcen kann nur durch die Abbildung dynamischer Abhängigkeitsbeziehungen im Rahmen einer Simulation hinreichend genau bestimmt werden.

Mit Hilfe der Simulationsergebnisse und der gegebenenfalls angepassten Ressourcenplanung kann eine korrekte Beurteilung von Strukturszenarien durchgeführt werden. Daher wurde die Anbindung der Simulation im Rahmen der rechnerbasierten Anwendungsunterstützung prototypisch umgesetzt (vgl. Abschnitt 8.2). Die Herleitung eines Produktionsdatenmodells zur standardisierten Verknüpfung der Planungsdaten mit bestehenden Simulationswerkzeugen ist jedoch nicht Teil der Aufgabenstellung und wird daher nicht weiter verfolgt.

6.2 Planung der Umsetzung von Rekonfigurationsprozessen

Im Anschluss an die Planung eines optimierten Fabriklayouts stellt sich die Frage nach der Umsetzung der neuen Produktionsstruktur. Bisher wird der Ablauf zur Realisierung neuer Strukturen häufig projekthaft ohne standardisiertes Vorgehen geplant (STEINMÜLLER 1997, S. 24 f.). Ziel der folgenden Ausführungen ist die Beschreibung einer Methode zur systematischen Planung von Migrationsprozessen. Dabei werden Einschränkungen, die sich aus der Verfügbarkeit des Perso-

nals, der erforderlichen Transportmittel sowie von Freiflächen ergeben, bei der Planung berücksichtigt. Ziel ist die Erstellung eines zeitlich optimierten Migrationsplans, mit dessen Hilfe sich eventuelle Produktionsunterbrechungen und die resultierenden Kosten abschätzen lassen.

6.2.1 Definition von Arbeitspaketen und Beziehungen

Der Inhalt und die Dauer der Tätigkeiten zur Umsetzung des neuen Layouts können bereits im Vorfeld festgelegt und in Form von Arbeitspaketen zusammengefasst werden. Jedes Arbeitspaket wird durch die erforderlichen Hilfs- und Transportmittel (z.B. Kräne), die benötigte Mitarbeiterkapazität (intern/extern) für Montage- und Transportprozesse sowie den zu erwartenden zeitlichen Aufwand charakterisiert. Da sowohl der zeitliche als auch der monetäre Aufwand bei innerbetrieblichen Verlagerungen vorwiegend vom betroffenen Betriebsmittel und nicht von der Distanz abhängen, können sie als statische Größen in den Stammdaten hinterlegt werden. Die Zeitdauer für die Maschinenumsetzung an sich kann innerhalb einer Fabrik als annähernd konstant angesehen werden. Der wesentliche Zeitanteil entfällt in der Regel auf die De- und Remontevorgänge und weniger auf den eigentlichen Transportvorgang. Im Sinne einer effizienten Planung sind Abweichungen daher zu vertreten.

Die Arbeiten zur Umsetzung eines Betriebsmittels können in drei Arbeitspaketen zusammengefasst werden (STEINMÜLLER 1997, S. 25):

- **Abbau des Betriebsmittels**

Der Abbau des Betriebsmittels beginnt mit dem Festhalten der aktuellen Qualitätsmerkmale und dem Sichern der Maschinendaten. Anschließend werden Versorgungsleitungen getrennt und die Betriebsstoffe abgelassen. Nach einer Grobreinigung erfolgt die elektrische und mechanische Demontage.

- **Transport des Betriebsmittels**

Dieses Arbeitspaket beinhaltet den eigentlichen Transportvorgang. Neben der Umsetzung des Betriebsmittels unter Verwendung geeigneter Transportmittel zählen dazu auch vorbereitende Handhabungsmaßnahmen.

- **Aufbau des Betriebsmittels**

Vor dem Aufbau müssen unter Umständen Fundamente vorbereitet werden. Nach einer Feinreinigung sowie Wartungs- und Umbauarbeiten können Änderungen an Verkettungseinrichtungen durchgeführt werden. Zum Schluss er-

6 Konzeption des Planungsmoduls

folgt die elektrische und mechanische Remontage sowie die Inbetrieb- und Abnahme.

Die Betriebsmittelanordnung im aktuellen und im geplanten Layout hat einen maßgeblichen Einfluss auf die mögliche Umsetzungsreihenfolge. Voraussetzung für den Umzug einer Maschine ist, dass die zugewiesene Fläche nicht (mehr) durch ein anderes Betriebsmittel belegt wird. Dieser Zusammenhang zwischen aktuellem und geplantem Layout wird in einer dynamischen Beziehungsmatrix erfasst (Abbildung 36). Aus den Zeilen der Matrix ist für jede Maschine abzulesen, welche Betriebsmittel vorher umgezogen werden müssen, um die zugewiesene Fläche freizugeben. Häufig ist es notwendig Betriebsmittel, auf einer Pufferfläche zwischen zu lagern, so dass eine Umsetzung erfolgen kann. Dies wird durch einen Eintrag in Zeile ‚P‘ der Matrix dargestellt. Nach jeder Umsetzung wird die Matrix angepasst.

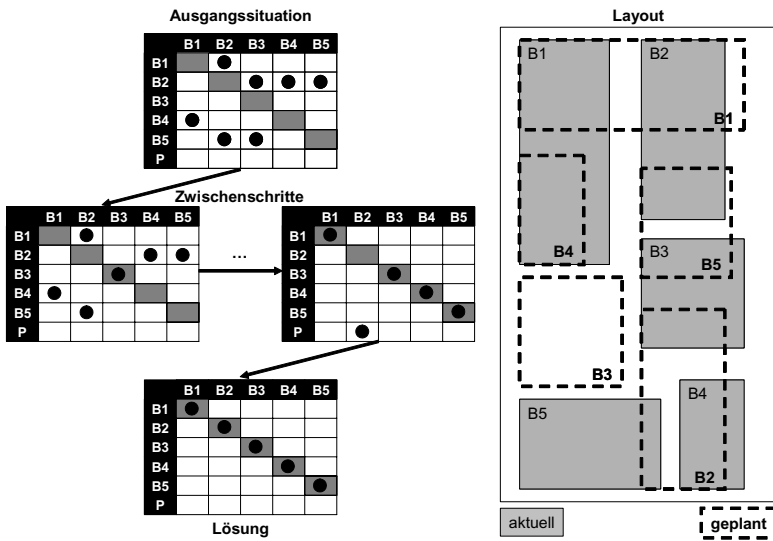


Abbildung 36: Dynamische Beziehungsmatrix

In Abbildung 36 wurde das aktuelle Layout (grau) mit dem geplanten Layout (gestrichelt) überlagert. Die Zusammenhänge werden in der Beziehungsmatrix dargestellt. Danach kann Betriebsmittel 1 erst dann auf die zugewiesene Fläche verschoben werden, nachdem Betriebsmittel 2 verlagert wurde. Der geplante Standort für Betriebsmittel 2 ist jedoch durch drei weitere Maschinen belegt. Da

innerhalb der Gruppenfläche nicht genügend Platz für die Zwischenlagerung zur Verfügung steht, muss Betriebsmittel 2 zuvor in eine ausgewiesene Pufferfläche verlagert werden.

6.2.2 Ablauf der Umsetzungsplanung

Nachdem die Beziehungen zwischen aktuellem und geplantem Layout mit Hilfe der Beziehungsmatrix erfasst wurden, lassen sich die Arbeitspakete unter Berücksichtigung vorgegebener Randbedingungen in eine optimierte Reihenfolge bringen. Ziel ist dabei die Reduzierung der durch die Strukturmigration bedingten Produktionsunterbrechung und der damit verbundenen Kosten. Folgende Randbedingungen müssen bei der Optimierung beachtet werden:

- Ein Betriebsmittel darf erst transportiert werden, wenn es abgebaut wurde.
- Das Betriebsmittel kann erst nach dem Transport wieder aufgebaut werden.
- Betriebsmittel können erst verlagert werden, wenn der zugewiesene Standort frei ist.
- Die Fläche zur Zwischenlagerung der Betriebsmittel ist beschränkt.
- Der Zugriff auf Mitarbeiter und Transportmittel unterliegt kapazitiven Einschränkungen.

Die Vorgehensweise für das Auffinden einer Lösung ist als Ablaufdiagramm in Abbildung 37 dargestellt. Zunächst werden die Betriebsmittel in eine Liste eingetragen und absteigend nach der Anzahl der Behinderungen, die durch sie entstehen, sortiert. Dazu summiert man spaltenweise die Einträge der Beziehungsmatrix (Ausgangssituation). In dem Beispiel aus Abschnitt 6.2.1 (Abbildung 36) werden die Verlagerungen von Betriebsmittel 1 und 5 durch das Betriebsmittel 2 behindert. Daraus ergäbe sich ($B_2=2$, $B_3=2$, $B_1=1$, $B_4=1$, $B_5=1$) als Reihenfolge in der Liste. Nun wird die Liste zeilenweise nach Betriebsmitteln durchsucht, die sich ohne Behinderung direkt anordnen lassen. In den Projektplan werden die entsprechenden Arbeitspakete übernommen. Gleichzeitig wird die Beziehungsmatrix aktualisiert und das Betriebsmittel aus der Liste gelöscht. Existiert kein unmittelbar verlagerbares Objekt, wird das oberste Element der Liste auf die Pufferfläche zur Zwischenlagerung gestellt. Dieser Vorgehensweise liegt die Annahme zugrunde, dass durch die Verlagerung des Objekts, welches die meisten geplanten Betriebsmittelflächen belegt, die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Zuordnung im Anschluss an die Verlagerung am größten ist. Der Algorith-

6 Konzeption des Planungsmoduls

mus lässt auch die Zwischenlagerung mehrerer Betriebsmittel zu, solange die zugewiesene Pufferfläche nicht überschritten wird. Eine Lösung ist gefunden, wenn alle Betriebsmittel ihrem geplanten Standort zugewiesen worden sind. Ist die zulässige Pufferfläche überschritten oder sind bereits alle verbleibenden Elemente der Liste im Puffer, ohne dass eine weitere Zuordnung möglich ist, existiert keine Lösung. In diesem Fall ist entweder die Anzahl der zu verlagernden Betriebsmittel zu senken oder die Pufferfläche zu vergrößern.

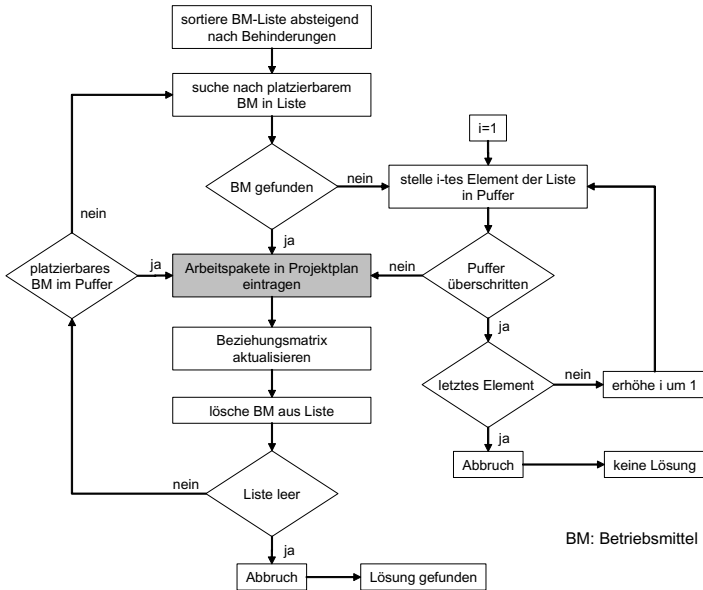


Abbildung 37: Algorithmus zur Umsetzungsplanung

Der Algorithmus analysiert und bewertet nicht alle möglichen Umsetzungsreihenfolgen, sondern sucht zielgerichtet nach einer optimierten Lösung. Es ist daher nicht auszuschließen, dass eine nicht berücksichtigte Reihenfolge der Arbeitspakete zu einer kürzeren Produktionsunterbrechung führt. Der Aufwand für eine vollständige Enumeration der Reihenfolgemöglichkeiten steigt jedoch mit der Anzahl der zu verlagernden Objekte exponentiell an. In Anbetracht der Tatsache, dass die Umsetzungsplanung vorwiegend der Kostenabschätzung für die Bewertung von Rekonfigurationsprozessen dient und daher lediglich eine Richtlinie für eine detaillierte Realplanung sein kann, scheint der zusätzliche Aufwand nicht gerechtfertigt.

Vorrangiges Ziel dieser Umsetzungsplanung ist die Abschätzung von Produktionsunterbrechungen, die einen Einfluss auf die Rekonfigurationskosten haben (vgl. Abschnitt 7.2). Der mit Hilfe des Lösungsalgorithmus ermittelte Migrationspfad stellt dabei eine idealisierte Form der Umsetzung dar. In der Realität ist mit einer längeren Umsetzungsphase aufgrund von Lieferzeiten für neue Maschinen, Kündigungsfristen bei Leasingverträgen, Problemen beim Wiederanlauf etc. zu rechnen. Sollte die Entscheidung zugunsten einer Rekonfiguration fallen, müssten diese Aspekte bei einer erweiterten Planung berücksichtigt werden. Für die Abschätzung der wirtschaftlichen Sinnhaftigkeit einer Strukturadaption ist die Verwendung eines idealisierten Szenarios jedoch zulässig.

Bei der Lösungssuche werden die erforderlichen Arbeitspakete in einen Projektplan übertragen. Wie bereits erwähnt, gliedert sich die Verlagerung in den Abbau, den Transport und den Aufbau des Betriebsmittels. Die notwendigen Kapazitäten im Bereich des Personals und der Transportmittel können tabellarisch erfasst werden. Tabelle 8 greift das Beispiel aus dem vorangegangenen Abschnitt auf. Für die De- und Remontage der Betriebsmittel B1 bis B5 stehen zwei externe Montagespezialisten sowie ein Mitarbeiter aus der Instandhaltung (M1 bis M3) zur Verfügung. Die großen Anlagen (B1 und B2) werden mit Hilfe eines Hallenkrans (T2) bewegt. Der Vorgang wird von zwei Mitarbeitern (W1 und W2) durchgeführt. Die kleineren Maschinen (B3 bis B5) lassen sich mit einem Gabelstapler (T1) transportieren, wobei die Aufnahme und Positionierung von Mitarbeiter W1 unterstützt wird. Der notwendige Zeitaufwand wird in Tagen angegeben.

	Abbau [d]			Transport [d]				Aufbau [d]		
	M1	M2	M3	T1	T2	W1	W2	M1	M2	M3
B1	2	2			0,5	0,5	0,5	3	3	
B2	1,5	1,5			0,5	0,5	0,5	2	2	
B3			1	0,25		0,25				1,5
B4			0,5	0,25		0,25				1
B5			1	0,25		0,25				1,5

Tabelle 8: *Beispiel für die erforderlichen Kapazitäten bei der Verlagerung von Betriebsmitteln*

Die Lösungssuche entsprechend des in Abbildung 37 dargestellten Algorithmus ergibt folgende Reihenfolge bei der Umsetzung:

B3→B2→B1→B4→B5

6 Konzeption des Planungsmoduls

Obwohl die Abfolge der Umsetzungsmaßnahmen sequentiell bestimmt wird, kann die Möglichkeit zur Parallelisierung mit Hilfe des Projektplans berücksichtigt werden. Unter Beachtung der zu Beginn dieses Abschnitts definierten Randbedingungen werden die Arbeitspakete bei erfolgreicher Zuordnung der Betriebsmittel zu dem frühest möglichen Zeitpunkt eingelastet. Für das obige Beispiel ergibt sich der Projektplan in Abbildung 38.

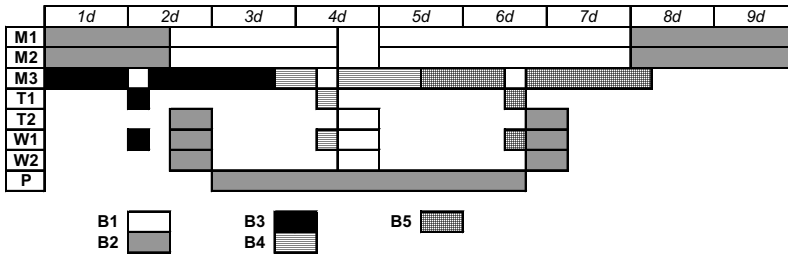


Abbildung 38: Beispiel eines Projektplans

Obwohl das Betriebsmittel 2 in der Reihenfolge erst an zweiter Stelle steht, kann mit dessen Abbau bereits parallel zu den Tätigkeiten am Betriebsmittel 3 begonnen werden. Da es anschließend auf der Pufferfläche zwischengelagert werden muss, erfolgt der Transportvorgang zweimal. Insgesamt ergibt sich eine theoretische Migrationsdauer von neun Tagen. In der Praxis ließe sich ein Arbeitspaket aufteilen, um die Zwischenräume im Projektplan zu schließen und damit die Kapazität optimal auszunutzen. Für die weiteren Überlegungen wird im Rahmen der Kostenabschätzung diese Möglichkeit aufgrund des zusätzlichen Aufwands zur Optimierung nicht weiter verfolgt. Der Projektplan enthält damit die notwendigen Eingangsinformationen für die Beurteilung der folgenden Kostenbewertung durch Produktionsunterbrechungen.

7 Konzeption des Bewertungsmoduls

Zweck des Bewertungsmoduls ist eine kostenmäßige Evaluation und Beurteilung von Strukturalternativen unter Berücksichtigung des Aufwands zur Rekonfiguration. Dafür werden im Sinne der Betriebsmodelle nach LABMANN (1983) alternative Strukturszenarien gesamthaft berechnet, weil sich nur auf diese Weise gesicherte Aussagen über alle kostenseitigen Auswirkungen von Entscheidungen treffen lassen. In Anlehnung an die *Kapazitätskostenrechnung* von MAYER (1998) werden die relevanten Kostenveränderungen bei Variation der Produktionsstruktur ermittelt und um die notwendigen Ausgaben für die Umsetzung der Strukturalternative ergänzt. Ein Vergleich der Einsparpotenziale mit den Rentabilitätsvorgaben des Unternehmens dient dazu, Investitionsentscheidungen abzuleiten. Auf der Basis dieses Instrumentariums können verschiedene Strukturalternativen hinsichtlich ihrer Kostenkonsequenzen vollständig bewertet werden.

7.1 Bewertung von Strukturalternativen

Im Vordergrund dieses Abschnitts steht die Ermittlung der Kostenveränderungen, die sich aus der Variation der Produktionsstruktur ergeben. RIEBELS Ansatz der Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung soll die „Diskrepanz zwischen kurzfristig orientierter Kostenrechnung und langfristiger Investitionsrechnung überwinden“ (1994, S. 602). Seine Trennung von *Leistungs-* und *Bereitschaftskosten* sowie die Definition eines *pagatorischen Kostenbegriffs* überzeugen, da darüber jede Schlüsselung von Kapazitätskosten ausgeschlossen wird. Gleichzeitig werden erforderliche Investitionsrechnungen durch die pagatorische Kostenerfassung vereinfacht. Leistungskosten umfassen nur solche Bestandteile, die sich entsprechend der zu erbringenden Leistung verändern. Bereitschaftskosten entstehen, indem Potenzialfaktoren, wie z.B. Maschinen, Personal, Gebäude etc., zur Verfügung gestellt werden, um eine gewisse Betriebsbereitschaft (Kapazitätsangebot) zu erlangen bzw. aufrecht zu erhalten. Ausgaben hierfür werden nicht durch die Erstellung weiterer Leistungseinheiten ausgelöst, sondern verändern sich lediglich durch den Auf- bzw. Abbau von Kapazitäten.

7.1.1 Ermittlung der Leistungskosten

Im Folgenden wird von unterschiedlichen Strukturalternativen auf der Grundlage eines gemeinsamen Gesamtproduktionsprogramm szenarios ausgegangen. Daher

7 Konzeption des Bewertungsmoduls

werden die Leistungskosten als Periodenkosten und nicht als Stückkosten ermittelt. Als relevante Leistungskosten ergeben sich für die industrielle Produktion nach MAYER (1998, S. 75):

- Fremdbezugskosten für Baugruppen
- Material-/Teilekosten
- Wartungskosten
- Energiekosten
- Lizenzkosten

Die Leistungskosten lassen sich über Verbrauchsbeziehungen berechnen, die zum Teil direkt durch das Produktionsprogramm determiniert werden (z.B. Fremdbezug von Baugruppen) oder sich in Abhängigkeit der erforderlichen Arbeitsfolgen und Betriebsmittel ergeben (z.B. Energiekosten). Die dafür notwendigen Verbrauchskoeffizienten sind häufig im Arbeitsplan abgelegt. Mittels der Verbrauchsbeziehungen kann für das betrachtete Produktionsprogramm der Güterverbrauch abgeleitet und mit den Beschaffungspreisen multipliziert werden (Abbildung 39). Zu ergänzen ist, dass für zeitquantenabhängige Leistungskosten (z.B. Werkzeuge, die nach einer bestimmten Bearbeitungszeit zu ersetzen sind) immer der ganzzahlig aufgerundete Wert herangezogen werden muss.

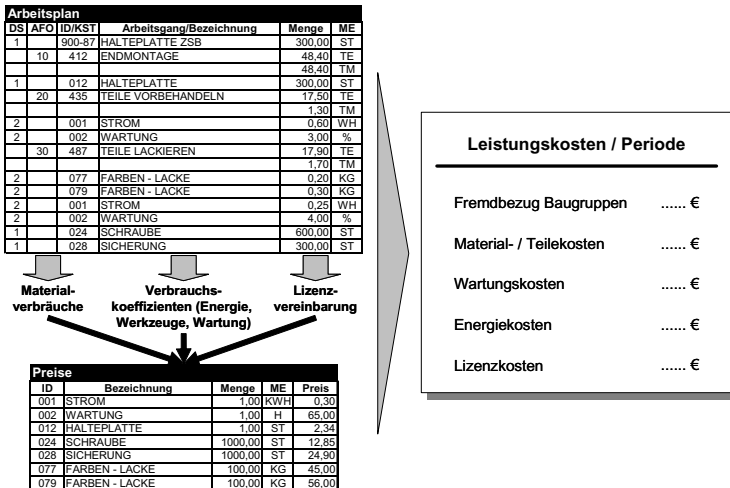


Abbildung 39: Ermittlung der Leistungskosten

7.1.2 Ermittlung der Bereitschaftskosten

Wie bereits mehrfach erwähnt, hat der Auf- und Abbau von Kapazitäten einen erheblichen Einfluss auf die Kostenstrukturen. Mit der Anpassung der Betriebsbereitschaft in Abhängigkeit von den Stückzahlentwicklungen können entscheidende Kostenvorteile im Wettbewerb erzielt werden. Für die weitere Differenzierung von Bereitschaftskosten lassen sich folgende Kategorien unterscheiden (MAYER 1998, S. 81):

- einmalig anfallende Bereitschaftskosten
- zeitlich gebundene, periodische Bereitschaftskosten
- zeitlich ungebundene, periodische Bereitschaftskosten

Ungebundene Bereitschaftskosten beziehen sich auf den Verbrauch von Repe-
tiefaktoren, die zur Aufrechterhaltung der Betriebsbereitschaft benötigt werden. Im Gegensatz zu Leistungskosten stehen sie nicht in direktem Leistungsbezug. Typische Beispiele hierfür sind die Kosten für Heizung und Beleuchtung. Die Möglichkeit zur Veränderung ungebundener Bereitschaftskosten ist jedoch eher theoretischer Natur. Sie sind daher im Sinne der Aufgabenstellung irrelevant und werden für die weiteren Überlegungen außer Acht gelassen.

Der Auf- und Abbau von Kapazitäten unterliegt zeitlichen Restriktionen. Die Zielsetzung ist daher, die Veränderbarkeit der Betriebsbereitschaft auch in zeitlicher Hinsicht zu berücksichtigen. Gerade im Hinblick auf die Investitionsrechnung ist eine terminliche Differenzierung von Zahlungsstromänderungen unerlässlich. Hinsichtlich der sachlichen Veränderbarkeit von Potenzialfaktoren lassen sich zwei Fälle unterscheiden (MAYER 1998, S. 82):

- Für Potenzialfaktoren, deren Beanspruchung einer bestimmten Produktionsaufgabe zugeordnet werden kann, d.h. die einem Kostenplatz fest zugeteilt sind (i.d.R. Maschinen und deren Kauf-, Leasing- oder Wartungsverträge), kann die sachliche Veränderbarkeit direkt aus dem geplanten Kapazitätsbedarf und der vorhandenen Betriebsbereitschaft abgeleitet werden.
- Für Potenzialfaktoren, die produktionssystemübergreifend eingesetzt werden (i.d.R. Werker, Meister oder Logistikressourcen), d.h. bei denen keine feste Zuordnung zu Kostenplätzen besteht, kann die Kapazität für bestimmte Produktionsaufgaben durch Umsetzung variiert werden. Daher lässt sich die absolute Veränderbarkeit nur über eine Betrachtung von Kapazitätspools realisieren.

Die Abhängigkeitsbeziehungen bei der Kapazitätsanpassung werden im Folgenden für die beiden Fälle weiter detailliert.

7.1.2.1 Beschreibung der zeitlichen Veränderbarkeit von Kapazitäten

Der zeitlichen Veränderbarkeit und den daraus resultierenden finanziellen Konsequenzen liegen Vertragsverhältnisse zugrunde. Um die korrekten zeitlichen Bindungen durch Kündigungs- und Auflösungszeitpunkte berücksichtigen zu können und die relevanten Auszahlungen zu ermitteln, müssen die Zusammenhänge in einer *Vertragsdatenbank* abgebildet werden (FISCHER 1997, S. 62).

Bei Kapazitätsanpassungen ist zwischen Auf- und Abbau zu unterscheiden. Für Abbauentscheidungen ergeben sich die zeitlichen Bindungen und finanziellen Konsequenzen aus bestehenden Einzelvertragsverhältnissen. Die zeitliche Veränderbarkeit hängt von den rechtlichen Bindungen, die durch die Ablaufzeitpunkte bei befristeten Verträgen und die Kündigungsfristen bei unbefristeten Verträgen bestimmt werden, ab. Die in Tabelle 9 genannten Merkmalsausprägungen bilden die Zeitdauer der Rechtswirksamkeit von nahezu allen Vertragsarten ab. Sachverhaltsbezogene Auflösungen beziehen sich in diesem Fall auf Rechtsverpflichtungen, die mit dem Wegfall des zugrunde liegenden Sachverhalts enden (z.B. Kfz-Haftpflichtversicherung bei Abmeldung des Fahrzeugs).

Die Zahlungsmodalität wird durch die Merkmale Zahlungsbeginn und Zahlungsart determiniert (STÖPPLER et al. 1992, S. 367). Der Liquidationserlös bei Abbau von gekauften Potenzialfaktoren kann nicht im Vorfeld festgelegt werden, da er sich aufgrund des Zeitpunkts, des Zustands und der Nachfrage situationsbedingt ergibt. Er ist daher bei der Betrachtung von Investitionsentscheidungen abzuschätzen und separat anzugeben.

Die zu erwartenden Zahlungsstromänderungen bei Kapazitätsaufbau lassen sich aus potenziellen (zukünftigen) Vertragsverhältnissen ableiten (FISCHER 1997, S. 58). Die für bestehende Verträge definierten Merkmale zur rechtlichen Bindung sind zu diesem Zeitpunkt in der Regel noch nicht bekannt. Daher können für potenzielle Verträge lediglich Zahlungsart und Betrag aufgenommen werden. Um analog zu den Bindungsfristen dennoch zeitliche Abhängigkeiten beschreiben zu können, wird das Merkmal ‚Verzögerungszeit‘ eingeführt. Damit wird die Zeitdauer zwischen Aufbaumentcheidung und deren Realisierung, z.B. für Lieferzeiten, beschrieben.

		Merkmale	Differenzierung	Merkmalsausprägung	
Bestehende Verträge	Zeitliche Veränderbarkeit durch rechtliche Bindung	Vertragsabschluss		<i>Datum</i>	
		Kündigungsfrist	(festes Zeitintervall)	<i>Wochen</i>	
		Mögliche Auflösungszeitpunkte	sachverhaltsbezogen		<i>SB</i>
	periodenbezogen		Monatsende	<i>ME</i>	
			Quartalsende	<i>QE</i>	
		Jahresende	<i>JE</i>		
Ablaufzeitpunkt	(bei befristetem Vertrag)		<i>Datum</i>		
Zahlungsmodalität	Zahlungsbeginn			<i>Datum</i>	
	Zahlungsart	einmalig anfallend			<i>EA</i>
		wiederkehrend anfallend	Perioden-anfang	Monat	<i>WMA</i>
				Quartal	<i>WQA</i>
				Jahr	<i>WJA</i>
		Perioden-ende		Monat	<i>WME</i>
Quartal				<i>WQE</i>	
Jahr	<i>WJE</i>				
Verzögerungszeit			<i>Wochen</i>		

Tabelle 9: *Zeitliche Veränderbarkeit und Zahlungsmodalität von Potenzialfaktoren nach MAYER (1998, S. 84)*

7.1.2.2 Bereitschaftskosten für kostenplatzbezogene Potenzialfaktoren

Für die Veränderung des Betriebsbereitschaftsgrads lassen sich intensitätsmäßige, zeitliche und kapazitive Anpassungsmöglichkeiten unterscheiden. Eine intensitätsmäßige Anpassung wird nicht weiter betrachtet, da sie nur für temporäre Kapazitätsveränderungen sinnvoll ist und nicht die Grundlage eines dauerhaft robusten Produktionsbetriebs darstellen kann. Eine zeitliche Anpassung kann über die Variation des Schichtmodells erreicht werden. Dabei wird vorausgesetzt, dass sich eine ökonomisch sinnvolle Schichtzahl bereits im Vorfeld ermitteln lässt bzw. dass Optimierungspotenziale im Rahmen der Arbeitsplanbestimmung ausgeschöpft wurden. Die personellen sowie finanziellen Konsequenzen werden über die Schließung bzw. Auflösung von Vertragsverhältnissen abgebildet.

Die Auswahl der Arbeitsplanalternativen (vgl. Abschnitt 6.1.1) bestimmt die Anzahl und Art der notwendigen Potenzialfaktoren. Im Falle der kostenplatzbezogenen Potenzialfaktoren betrifft dies vor allem die Betriebsmittel und die zugehörigen Vertragsverhältnisse. Die aktuellen Vertragsdateien für die bestehende

7 Konzeption des Bewertungsmoduls

Produktionsstruktur sind in einer Datenbank abgelegt. Die Veränderungen von Potenzialfaktoren, die sich aus unterschiedlichen Strukturszenarien ergeben, werden jeweils in separaten Datenbanken abgespeichert (Abbildung 40).

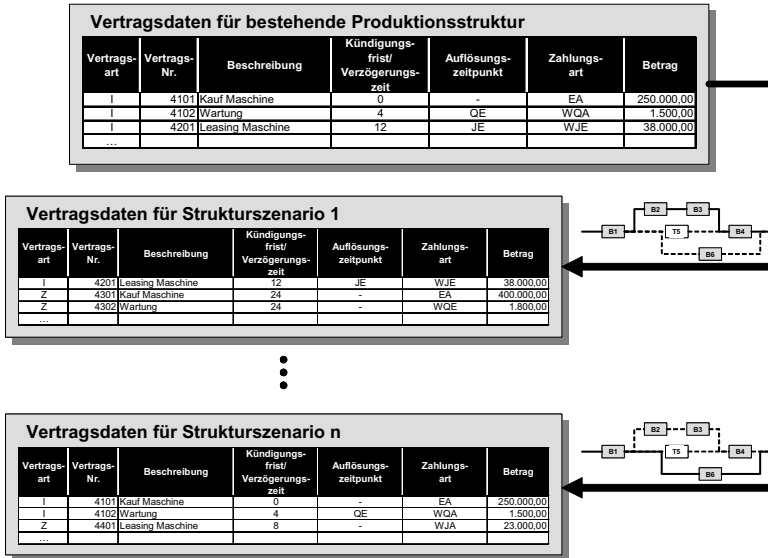


Abbildung 40: Beschreibung von Kapazitätsveränderungen in Vertragsdatenbanken

Zukünftige Verträge, die für den Kapazitätsaufbau notwendig werden, sind mit einem ‚Z‘ gekennzeichnet. Sie werden bei der Bewertung entsprechend ihres Realisierungszeitpunkts als Auszahlungen berücksichtigt. Einträge ohne diese Kennzeichnung deuten auf bereits bestehende Verträge hin, die in dem zugehörigen Strukturszenario aufgelöst werden und damit zu einer Verminderung der Auszahlungen führen. Die Kennzeichnung ‚I‘ steht in diesem Zusammenhang für Individualverträge. Im Gegensatz zu mit ‚S‘ gekennzeichneten Verträgen (vgl. nachfolgenden Abschnitt) lassen sie sich nicht von einem Standardvertrag ableiten. Für die Bewertung finanzieller Konsequenzen von Strukturadaptionen genügt eine Differenzbetrachtung, die auf der Basis dieser Datenbanken abgeleitet werden kann (vgl. Abschnitt 7.3).

7.1.2.3 Bereitschaftskosten für Potenzialfaktoren ohne feste Zuordnung

Im Gegensatz zu den kostenplatzgebundenen Potenzialfaktoren werden in sog. Kapazitätspools solche Potenziale zusammengefasst, die

- entweder kurzfristig anderen Kostenplätzen zugeordnet werden können, wie z.B. Werker, oder
- entsprechend ihrer Aufgabenstellung nicht einzelnen Kostenplätzen, sondern nur übergeordneten Einheiten zuordenbar sind, wie z.B. Meister oder Logistikressourcen.

Nachdem Kapazitätspools gleichartige Potenzialfaktoren beinhalten, wird das Kapazitätsniveau als Stückzahl der jeweiligen Kapazitätsart angegeben. Im Gegensatz zu technischen Einheiten (z.B. Transportmittel) muss beim Personal nach Schichteinsatz unterschieden werden. Zum einen stehen Personen des 1-Schichtbetriebs nicht ohne weiteres für den 2-Schichtbetrieb zur Verfügung. Zum anderen sind unterschiedliche vertragliche Rahmenbedingungen mit dem Schichteinsatz verknüpft, die in einer eigenen Kapazitätsart erfasst werden. Die zeitlichen Bindungen und finanziellen Konsequenzen sind genau wie bei den kostenplatzbezogenen Potenzialfaktoren in Vertragsdatenbanken hinterlegt. Aufgrund der Gleichartigkeit lassen sich vielfach Standardverträge definieren (mit ‚S‘ gekennzeichnet), aus denen sich einzelne Verträge ableiten lassen.

Bedingt durch die kostenplatzübergreifende Einsetzbarkeit ist die Ermittlung des Kapazitätsbedarfs rein auf der Basis des Produktionsprogramms unzureichend. Dieses Vorgehen würde die genaue Kenntnis eindeutiger Verbrauchsbeziehungen voraussetzen, um mittels definierter Verbrauchskoeffizienten die erforderlichen Kapazitäten berechnen zu können. Da diese Verbrauchsbeziehungen jedoch maßgeblich durch das Produktionslayout z.B. hinsichtlich Mehrmaschinenbedienung oder Transportwegen beeinflusst werden, bietet sich der Einsatz von (Ablauf-)Simulationswerkzeugen an. Darüber lassen sich gegebenenfalls Überkapazitäten, speziell im Hinblick auf Logistikressourcen, feststellen, die aufgrund dynamischer Zusammenhänge notwendig sind, um einen reibungslosen Produktionsbetrieb zu gewährleisten. Die Forderung von PETERMANN et al. (2000, S. 15), nach der „für die Ermittlung der anfallenden Kosten eine Erweiterung der Simulation um Elemente der Kostenrechnung erforderlich ist“, wird in diesem Zusammenhang umgekehrt. Die Simulation dient hier eher als Erweiterung bzw. Unterstützung einer exakten Kostenrechnung.

7 Konzeption des Bewertungsmoduls

Ergebnis der Simulation ist der Kapazitätsbedarf in Abhängigkeit des Strukturszenarios, gruppiert nach Kapazitätsarten. Steht kein Simulationswerkzeug zur Verfügung, muss ein technisch determinierter, linearer Zusammenhang zwischen zugeordneten Arbeitsvolumina (auf Basis des Produktionsprogramms) und dem kostenplatzübergreifenden Ressourcenverbrauch zur Berechnung des Kapazitätsbedarfs angenommen werden. Durch die Gegenüberstellung von aktuellem Kapazitätsangebot und Kapazitätsbedarf für das jeweilige Strukturszenario können Kostenveränderungen mittels der Vertragsdatenbanken dargestellt werden (Abbildung 41).

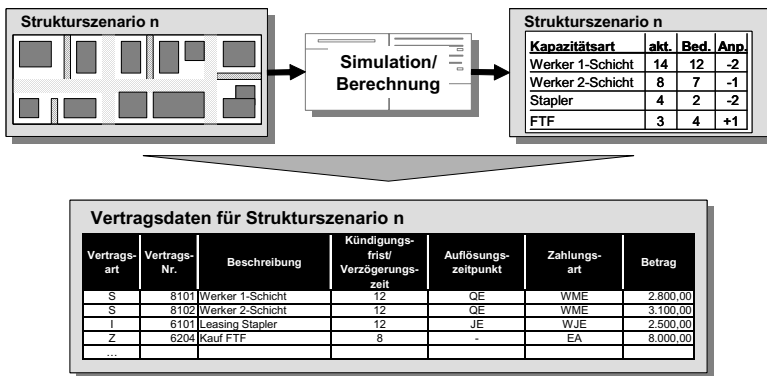


Abbildung 41: Ermittlung von Kapazitätsveränderungen bei kostenplatzübergreifenden Potenzialfaktoren

7.2 Bewertung des Migrationsaufwands

Der Aufwand zur Rekonfiguration des Produktionssystems setzt sich aus den eigentlichen Kosten für die Verlagerung der Ressourcen (*statischer Aufwand*) sowie den Kosten, die sich aus der Produktionsunterbrechung ergeben (*dynamischer Aufwand*), zusammen (LEE 1998, S. 1031 f.). Die Kosten für die Maschinenverlagerung sind vom Grad der Mobilität abhängig, der im Produktionssystem umgesetzt wurde. Dieser Mobilitätsgrad lässt sich mit den entsprechenden Daten für den zeitlichen und finanziellen De- und Remontageaufwand sowie den Kosten für zusätzlich erforderliche Ausrüstung beschreiben und im Planungswerkzeug hinterlegen. Die Kosten für Produktionsunterbrechungen sind vom

Migrationspfad abhängig und müssen für jedes Produkt einzeln betrachtet werden.

7.2.1 Bestimmung der statischen Aufwände

Die Kosten, die für die Verlagerung von Betriebsmitteln entstehen, können als statisch angesehen werden, da sie unabhängig von der Umsetzungsreihenfolge anfallen. Sie werden vorwiegend durch den Einsatz externer Montagespezialisten für den Ab- und Aufbau der Betriebsmittel verursacht. Die Kosten für betriebszugehörige Mitarbeiter werden nicht zu den Rekonfigurationskosten hinzugezählt, da der entsprechenden Leistung bestehende Vertragsverhältnisse zugrunde liegen, die bereits als Bereitschaftskosten berücksichtigt sind. Die Zeitdauern zur De- und Remontage wurden bereits für die Ermittlung von Arbeitspaketen im Rahmen der Umsetzungsplanung hinterlegt (vgl. Abschnitt 6.2.1) und ergeben durch Multiplikation mit den entsprechenden Kostensätzen die statischen Rekonfigurationsaufwände. Die Kosten für zusätzlich erforderliche Ausrüstung können ebenfalls als konstant angesehen werden und lassen sich dementsprechend ebenfalls im System verankern.

Abbildung 42 greift das Beispiel aus Abschnitt 6.2.2 auf. Danach werden für die De- und Remontage der Betriebsmittel B1 und B2 zwei externe Montagespezialisten benötigt. Die Kapazität der eigenen Mitarbeiter spielt finanziell aus genannten Gründen keine Rolle. Die erforderlichen Transportmittel T1 und T2 zählen zum Betriebsinventar und können daher ebenfalls vernachlässigt werden. Nachdem in diesem Beispiel keine zusätzliche Ausrüstung erforderlich ist, lässt sich der statische Rekonfigurationsaufwand direkt ableiten. Addiert man die Kapazitäten der externen Spezialisten, so ergibt sich ein zeitlicher Aufwand von 17 Tagen. Legt man einen Tagessatz von 560 € zugrunde, so errechnet sich der statische Rekonfigurationsaufwand zu 9520 €.

	Abbau [d]			Transport [d]			Aufbau [d]			
	M1	M2	M3	T1	T2	W1	W2	M1	M2	M3
B1	2	2			0,5	0,5	0,5	3	3	
B2	1,5	1,5			0,5	0,5	0,5	2	2	
B3			1	0,25		0,25				1,5
B4			0,5	0,25		0,25				1
B5			1	0,25		0,25				1,5

Zeitlicher Aufwand: 17 Tage

×

Statischer Rekonfigurationsaufwand: 9520 €

Kostensatz: 560 € pro Tag

Abbildung 42: Bestimmung der statischen Aufwände

7.2.2 Bestimmung der dynamischen Aufwände

Der Aufwand, der sich aus Produktionsunterbrechungen durch die Verlagerung von Betriebsmitteln ergibt, wird als dynamisch bezeichnet, da er maßgeblich vom Migrationspfad abhängig ist. Je nach Umsetzungsreihenfolge können Produkte unterschiedlich von Produktionsunterbrechungen betroffen sein. Daher ist der Produktionsstillstand für jedes Produkt einzeln zu identifizieren. Die Basis hierfür bildet der Projektplan. Die Produktionsunterbrechung für ein Produkt beginnt mit dem Abbau des ersten Betriebsmittels der zugehörigen Prozesskette und endet mit dem Aufbau des letzten betroffenen Betriebsmittels.

Zur Verdeutlichung der Zusammenhänge wird wiederum das Beispiel aus Abschnitt 6.2.2 herangezogen. Produkt X wird auf den Betriebsmitteln B1, B3 und B5 hergestellt, Produkt Y auf den Betriebsmitteln B2 und B4 (Abbildung 43). Die Produktionsunterbrechung für Produkt X beginnt mit dem Abbau von Betriebsmittel B3 und endet mit dem Aufbau von Betriebsmittel B5. Sie dauert damit laut Projektplan insgesamt 7,25 Tage. Analog kommt die Herstellung von Produkt Y mit dem Abbau von Betriebsmittel B2 zum Erliegen und kann nach neun Tagen mit dem Aufbau desselben Betriebsmittels weitergeführt werden. Geht man weiterhin davon aus, dass der Produktionsbetrieb am Wochenende ruht, ergibt sich für Produkt X und Y eine effektive Produktionsunterbrechung von jeweils fünf Tagen.

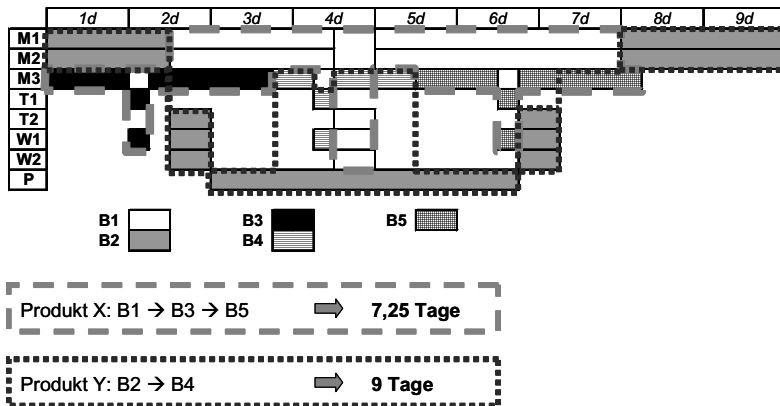


Abbildung 43: Ableitung der Produktionsunterbrechung aus dem Projektplan

Der Produktionsunterbrechung kann auf unterschiedliche Weise begegnet werden. Der sicherlich häufigste Fall ist die Vorproduktion, um das Ausbringungsdefizit zu kompensieren. Dabei werden die eigenen Kapazitäten temporär durch Überstunden oder Zusatzschichten erweitert, die in der Regel Zuschläge bei den Personalkosten bedingen. Da der Teilevorlauf zusätzlich zum regulären Produktionsbetrieb realisiert werden muss, entfällt diese Option bei durchgängigem Dreischichtbetrieb. Die entstehenden Mehrkosten bei Vorproduktion hängen maßgeblich von den arbeitsrechtlichen Rahmenbedingungen des Unternehmens ab. Auf der Basis flexibler Arbeitszeitmodelle ist unter Umständen eine kostenneutrale Vorproduktion möglich. Die exakte Bestimmung der Mehraufwendungen setzt eine detaillierte Feinplanung der Migrationsphase voraus.

Für einfache Teile oder Baugruppen ist die Fremdvergabe einzelner Arbeitsschritte für einen begrenzten Zeitraum denkbar. Allerdings setzt dies umfangreiche Vertragsverhandlungen und technische Absprachen voraus. Gleichzeitig erfordert die Vergabe von Produktionsaufgaben eine exakte Koordination mit den verbleibenden Produktionsprozessen. In jedem Fall ist mit Mehrkosten bei der Herstellung zu rechnen.

Ist der Produktionsausfall nicht zu kompensieren, muss in der Regel die Möglichkeit zur Strukturadaption verworfen werden. Dies ist speziell in der Zulieferindustrie der Fall, um bestehende Kundenbeziehungen nicht zu gefährden. Zudem werden Lieferausfälle häufig mit hohen Konventionalstrafen belegt, so dass eine wirtschaftliche Rekonfiguration nicht mehr gewährleistet werden kann. Eine kostenneutrale Überproduktion zur Kompensation der Produktionsunterbrechung wird nur in den seltensten Fällen zu realisieren sein. Eine Ausnahme stellt die Möglichkeit zur Strukturmigration während eines längeren Stillstands des Produktionsbetriebs (z.B. Betriebsferien) dar.

Wie aus den vorangegangenen Ausführungen hervorgeht, erweist sich die Quantifizierung der Zusatzkosten als schwierig. Ziel und Zweck der hier vorgestellten Methodik ist die Vorbereitung einer Entscheidung zur Weiterverfolgung und Detaillierung eines bestimmten Strukturszenarios. Im Rahmen dieser Vorentscheidung erscheint der Aufwand für die exakte Ermittlung der Mehraufwendung als unangemessen, so dass Erfahrungswerte und Tendenzaussagen die Basis der Kostenerfassung bilden müssen. Gerade im Falle einer Vorproduktion, bei der Mehrkosten vornehmlich durch den außerordentlichen Personaleinsatz hervorgerufen werden, lassen sich dennoch hinreichend genaue Abschätzungen treffen.

7 Konzeption des Bewertungsmoduls

Zur Orientierung dienen die regulären Herstellkosten eines Produktes. Da sich üblicherweise der Personalanteil an den Herstellkosten ausweisen lässt, kann der Mehraufwand in Abhängigkeit der arbeitsrechtlichen Bestimmungen (z.B. Überstundenzuschuss, Schichtzuschlag) bemessen werden. Beispielsweise verursacht ein Werker der dritten Schicht 21 Prozent höhere Personalkosten als sein Kollege der zweiten Schicht. Ergibt sich der personalbedingte Anteil der Herstellkosten für Produkt X zu 23 Prozent, so lassen sich die Mehraufwendungen für Vorproduktion auf ca. fünf Prozent der Herstellkosten abschätzen. Gemeinsam mit der geforderten Ausbringung und der effektiven Dauer der Produktionsunterbrechung können basierend auf den Herstellkosten die zusätzlichen Aufwendungen zur Kompensation der Strukturmigration bemessen werden (Abbildung 44).

Personalkosten/Monat		Produkt X		Produkt Y	
Werker 2-Schicht	3.100,00	Tagesproduktion	180		260
Werker 3-Schicht	3.750,00	Herstellkosten	240,00		160,00
	+ 21 %	Personalanteil	23%		28%
		Zusatzaufwand	5%		6%
		Zusatzkosten pro Stück	11,59		9,41
		eff. Produktionsunterbrechung [d]	5		5
		Zusatzkosten gesamt	10.432,80		12.230,40

Abbildung 44: Bestimmung der dynamischen Aufwände durch Abschätzung der Mehraufwendungen bei den Herstellkosten (Personalkostenanteil)

7.3 Auswahl einer Strukturalternative

Aus der Gegenüberstellung der Effizienzsteigerung und des Rekonfigurationsaufwands lässt sich die geeignete Layoutvariante ermitteln. Darüber hinaus kann der Zeitpunkt der Amortisation für die Rekonfiguration zur Risikoabschätzung bestimmt werden. Auf der Basis dieser Aussage obliegt es dem Planer, die Anpassung der Produktionsstruktur einzuleiten. In diesem Fall erfolgt die Rückmeldung der Planungsergebnisse an die Produktionssteuerung, um einleitende Maßnahmen wie Teilverlauf oder Fremdvergabe vorzunehmen.

In der Regel ordnet man kurzfristige Planungsprobleme der Kostenrechnung zu, während man längerfristige Planungstatbestände als Investitionsproblem betrachtet. Eine derartige Zuordnung sowie eine eindeutige Trennung zwischen diesen beiden Rechnungssystemen sind wegen der Interdependenzen kaum durchführbar. „Vielmehr erscheint es fruchtbar, durch eine stärkere Verbindung zwischen ihnen die Probleme der Zurechnung längerfristig gebundener Einsatzgüter ...

einer Lösung näher zu bringen“ (SCHWEITZER & KÜPPER 1991, S. 439). Daher wurde bei der Ermittlung von Kostenpotenzialen der pagatorische Kostenbegriff gewählt. Die Berücksichtigung reiner Zahlungsstromveränderungen erlaubt eine direkte Überführung in die Investitionsrechnung.

7.3.1 Ermittlung der Differenzdeckungsbeiträge

Die Bewertung von Strukturszenarien erfolgt auf der Basis der von KLEINER (1991) entwickelten *Differenzdeckungsbeitragsrechnung*. Dabei handelt es sich weniger um einen eigenständigen Ansatz zur Kostenrechnung (vgl. Abschnitt 3.3.1) als um eine abgeänderte Bewertungsperspektive. Das Untersuchungsziel ist nicht mehr die monetäre Beurteilung eines einzelnen Produktionssystems, sondern der Vergleich zweier konkurrierender Produktionsalternativen. Dazu wird für ein untersuchtes Szenario aufgezeigt, welche Kosten- und Erlöspositionen im Sinne von Zahlungsstromveränderungen sich ausgehend von der aktuellen Situation in Abhängigkeit der sachlich und zeitlich differenzierten Kostenabhängigkeitsbeziehungen (vgl. Abschnitt 7.1) ergeben. Jede Zahlungsstromveränderung wird stufenweise als Folge von Strukturveränderungen durch Auf- oder Abbau einzelner Potenzialfaktoren (Verträge) zeitlich differenziert aufgezeigt.

Im Gegensatz zur Gesamtdeckungsbeitragsrechnung werden bei der Ermittlung von Differenzdeckungsbeiträgen alle Veränderungen in ihren originären Größen ausgewiesen, d.h. es sind keinerlei verrechnete Kosten, weder in sachlicher noch in zeitlicher Hinsicht enthalten. Während die Ermittlung der Umsatzerlöse und Leistungskosten in gleicher Weise wie bei der Gesamtdeckungsbeitragsrechnung erfolgt, unterscheidet sich die Gliederung der vertraglich gebundenen Bereitschaftskosten grundlegend. Ausgehend von der Differenz aus Umsatz und Leistungskosten werden alle Einzelverträge mit laufenden Zahlungen in zeitlich aufsteigender Reihenfolge bis zu dem Zeitpunkt, an dem das geplante Produktionsprogramm realisiert werden kann, dargestellt. Der Abbau von Potenzialfaktoren geht dabei positiv, der Aufbau zusätzlicher Kapazitäten negativ in das Ergebnis ein. Der daraus resultierende Deckungsbeitrag gibt die Zahlungsstromveränderung zum Realisierungszeitpunkt wieder. Anschaffungsauszahlungen und Liquidationserlöse werden addiert und den Jahresdeckungsbeiträgen gegenübergestellt. Aus der Relation von Investitionsaufwendungen und Deckungsbeitragsdifferenzen lässt sich ableiten, ob das Ergebnis den Amortisationserwartungen des Unternehmens entspricht.

7 Konzeption des Bewertungsmoduls

Für die Bewertung der Strukturszenarien müssen zwei Fälle unterschieden werden. Handelt es sich um eine leistungsgetriebene Strukturadaptation, ist die Entwicklung des zukünftigen Produktionsprogramms mit der bestehenden Kapazitätsstruktur nicht mehr vollständig abzubilden. In diesem Fall sind in der Regel zusätzliche Kapazitäten aufzubauen, um den gesteigerten Marktanforderungen gerecht zu werden. Eine strategische Alternative könnte die Einschränkung des Produktionsprogramms unter Beibehaltung der bestehenden Struktur sein. Die aufgrund der Produktionsprogrammunterschiede variierenden Umsatzpositionen sind entsprechend bei der Differenzbetrachtung zu berücksichtigen. Bei der kostengetriebenen Strukturanpassung wird die bestehende Produktionsstruktur mit verschiedenen Strukturszenarien auf der Grundlage des gleichen zukünftigen Produktionsprogramms verglichen. Es entstehen daher keine Umsatzdifferenzen, so dass die Differenzdeckungsbeitragsrechnung alleine auf die Kostenveränderungen fokussiert werden kann. Die dazu erforderlichen Informationen können direkt aus den Vertragsdatenbanken der einzelnen Strukturszenarien ausgelesen werden (vgl. Abschnitt 7.1.2).

Abbildung 45 beschreibt den Ablauf der Differenzdeckungsbeitragsrechnung. Im Falle einer leistungsgetriebenen Rekonfiguration muss zunächst die Differenz der Umsatzerlöse bestimmt werden. Für kostengetriebene Strukturszenarien ist dieser Wert null. Davon wird die Differenz der produktionsprogrammbezogenen Leistungskosten abgezogen, die sich aus den Ressourcenverbräuchen in Abhängigkeit der Arbeitsplanalternative ergeben (Deckungsbeitrag I). Die Ermittlung der vertraglich gebundenen Bereitschaftskosten und deren Zahlungsstromkonsequenzen bei Abschluss oder Auflösung von Verträgen ist wie folgt gegliedert:

- Die auf Jahresbeträge hochgerechneten laufenden Zahlungen werden zur Berechnung unterschiedlicher Deckungsbeiträge zuerst aufgeführt, einmalig anfallende Beträge (Anschaffungsauszahlungen, Liquidationserlöse, Rekonfigurationsaufwände) zum Schluss. Die Kosten aufgelöster Verträge werden addiert, die hinzukommender Verträge subtrahiert.
- Das geplante Produktionsprogramm kann erstmals produziert werden, wenn alle notwendigen Kapazitäten vorhanden sind. Daher muss bei leistungsgetriebenen Strukturszenarien zusätzlich ein Deckungsbeitrag II ermittelt werden, der die Zahlungsstromveränderung zum Realisierungszeitpunkt wiedergibt. Dafür werden sämtliche Einzelverträge mit laufenden Zahlungen in aufsteigender Reihenfolge bis zum Realisierungstermin dargestellt.

Vertragsdatenbanken

Vertragsart	Vertrags-Nr.	Beschreibung	Kündigungsfrist/Verzögerungszeit	Auflösungszeitpunkt	Zahlungsart	Betrag
I	4201	Leasing Maschine	12	JE	WJE	38.000,00
Z	4301	Kauf Maschine	24	-	EA	400.000,00
						1.800,00

Vertragsart	Vertrags-Nr.	Beschreibung	Kündigungsfrist/Verzögerungszeit	Auflösungszeitpunkt	Zahlungsart	Betrag
S	8101	Werker 1-Schicht	12	OE	WME	2.800,00
S	8102	Werker 2-Schicht	12	OE	WME	3.100,00
I	6101	Leasing Stapler	12	JE	WJE	2.500,00
Z	6204	Kauf FTF	8	-	EA	8.000,00

Differenzdeckungsbeitrag			
Umsatzdifferenz		01.09.2004	0,00
./. Leistungskostendifferenz			1.200,00
Diff. DB I			1.200,00
./. Z 4401 Leasing Maschine		01.09.2004	-1.920,00
./. I 4102 Wartung		30.09.2004	1.500,00
./. S 8102 Werker 2-Schicht		30.09.2004	3.100,00
Zwischenergebnis September			3.880,00
./. I 4201 Leasing Maschine		31.12.2004	3.170,00
./. I 6101 Leasing Stapler		31.12.2004	2.500,00
Diff. DB		31.12.2004	9.550,00

Notwendige Anschaffungsauszahlungen	
Z 6204 Kauf FTF	-8.000,00
Statischer Rekonfigurationsaufwand	-9.520,00
Dynamischer Rekonfigurationsaufwand	-22.700,00
Liquidationserlöse	
I 4101 Verkauf Maschine	5.000,00
Summe Investitionen	-35.220,00

Rekonfigurationsaufwände

	Abbau [d]			Transport [d]			Aufbau [d]			
	M1	M2	M3	T1	T2	W1	W2	M1	M2	M3
B1	2	2			0,5	0,5	0,5	3	3	
B2	1,5	1,5			0,5	0,5	0,5	2	2	
B3			1	0,25		0,25				1,5
B4			0,5	0,25		0,25				1
B5			1	0,25		0,25				1,5

	Produkt X	Produkt Y
Tagesproduktion	180	260
Herstellkosten	240,00	160,00
Personalanteil	23%	28%
Zusatzaufwand	5%	6%
Zusatzkosten pro Stück	11,59	9,41
eff. Produktionsunterbrechung [d]	5	5
Zusatzkosten gesamt	10.432,80	12.230,40

Abbildung 45: Ermittlung des Differenzdeckungsbeitrags

- Aufgrund längerer Kündigungsfristen können auch nach dem Realisierungszeitpunkt weitere Verträge entfallen. Auch diese Verträge werden zeitlich aufsteigend dargestellt und mit monatlichen Zwischenergebnissen ausgewiesen.
- Da kostengetriebenen Strukturszenarien keine unterschiedlichen Produktionsprogramme zugrunde liegen, werden folglich auch keine Verzögerungen durch Kapazitätsanpassungen im Hinblick auf Umsatzdifferenzen wirksam.

Die Berücksichtigung des Realisierungszeitpunkts ist somit für die Investitionsrechnung irrelevant, die Ermittlung des Deckungsbeitrags II entfällt.

- Anschaffungszahlungen, Liquidationserlöse und Rekonfigurationsaufwände werden summiert und als Investitions- bzw. Desinvestitionssummen den Jahresdeckungsbeiträgen unverrechnet gegenübergestellt.

Wie bereits beschrieben, berücksichtigt die Umsetzungsplanung von Rekonfigurationsprozessen nicht die zeitlichen Restriktionen, die sich aus vertraglichen Bindungen oder Lieferzeiten ergeben. Der so ermittelte Migrationspfad kann daher von den vertraglich bedingten Realisierungszeitpunkten abweichen. Die Verwendung der abgeleiteten Migrationskosten ist dennoch zulässig, weil darüber ein Idealfall der Strukturmigration zugrunde gelegt wird. Damit lässt sich ermitteln, ob ein Strukturszenario theoretisch überhaupt zu einem positiven Ergebnis führen kann. Die Ergebnisse der Differenzdeckungsbeitragsrechnung bilden die Eingangsgrößen für die folgende Investitionsrechnung.

7.3.2 Ermittlung des Kapitalwerts und des Amortisationszeitpunkts

Zur Ermittlung der Zahlungsreihe im Rahmen der *Kapitalwertbewertung* werden in der betrieblichen Praxis häufig die zahlungsflussrelevanten Informationen der Kosten- und Leistungsrechnung aus dem internen Rechnungswesen entnommen. Die Integration der Kosten- und Leistungsrechnung in die Investitionsrechnung ist auf der Basis des *Preinreich/Lücke-Theorems* grundsätzlich möglich (PREINREICH 1937; LÜCKE 1955; KEMMINER 1999, S. 213-254). Gemäß dem Theorem entspricht das Ergebnis einer Kapitalwertberechnung auf der Basis von Zahlungsströmen dem Ergebnis einer Kapitalwertberechnung auf der Basis von Periodenerfolgsgrößen (z.B. Kosten und Erlöse), sofern

- die Summe der Zahlungsüberschüsse aller Perioden gleich der Summe aller Periodengewinne ist und
- der Periodengewinn der aktuellen Periode um die kalkulatorischen Zinsen auf das gebundene Kapital der Vorperiode verringert wird.

Der Kapitalwert einer Investition (engl.: net present value) im Zeitpunkt $t = 0$ ist definiert als Barwert ihrer Nettozahlungen. Dies entspricht dem Barwert der Rückflüsse zuzüglich des Barwerts von Liquidationserlösen und abzüglich des Barwerts von Investitionsausgaben. Unter der Voraussetzung, dass alle mit einer Investition verbundenen Zahlungen in diskreten, äquidistanten Zeitpunkten $t = 0, \dots, T$ erfolgen (im Folgenden werden vereinfacht die Zahlungsstromverände-

rungen auf das Monatsende bezogen) und die gesamten Investitionsausgaben in $t = 0$ anfallen, gilt für den Kapitalwert C_0 (BLOHM & LÜDER 1995, S. 58 f.):

$$C_0 = -I_0 + \sum_{t=1}^T R_t \cdot q^{-t} \quad (24)$$

$$q^{-t} = (1+i)^{-t} \quad (25)$$

I_0 Investitionsausgaben zu Beginn des Planungszeitraums

R_t Zahlungsfluss zum Zeitpunkt t

q^{-t} Abzinsungsfaktor

i Zinssatz

T Ende des Planungszeitraums

Die Liquidationserlöse zum Ende des Planungszeitraums werden vernachlässigt, da keine gesicherten Aussagen möglich sind, ob und in welcher Höhe eine Liquidation erfolgen kann. Die Differenzdeckungsbeitragsrechnung bildet die Basis zur Ermittlung des Kapitalwerts. Da dabei ausschließlich Zahlungsstromkonsequenzen, die sich aus der Veränderung der bestehenden Produktionsstruktur zu einem geplanten Strukturszenario ergeben, betrachtet werden, kann direkt über die Vorteilhaftigkeit einer Strukturalternative entschieden werden. Die Investition in eine Strukturadaption gilt dann als vorteilhaft, wenn der Kapitalwert nicht negativ ist, d.h. wenn

$$C_0 \geq 0 \quad (26)$$

gilt. Ist der Kapitalwert einer Investition positiv, dann verzinst sich das zu jedem Zahlungszeitpunkt noch gebundene Kapital zum Kalkulationszinssatz i , und darüber hinaus wird ein Vermögenszuwachs erwirtschaftet.

Legt man die Differenzdeckungsbeitragsrechnung aus dem vorigen Abschnitt als Beispiel zugrunde, ergibt sich die Zahlungsstromreihe in Tabelle 10. Für die Berechnung wurde ein Planungszeitraum von einem Jahr angenommen und ein Kalkulationszins von 12 Prozent im Jahr zugrunde gelegt. Aus der Differenzdeckungsbeitragsrechnung aus Abschnitt 7.3.1 ergeben sich (zusammengefasste) Zahlungsstromänderungen durch den Abbau bzw. Aufbau von Potenzialfaktoren (Verträgen) zum 30.09.2004 und zum 31.12.2004 (Abbildung 45). Unter den notwendigen Investitionsausgaben werden die Anschaffungszahlungen für den Kapazitätsaufbau, die statischen und dynamischen Rekonfigurationsaufwände sowie die Erlöse aus der Liquidation von Potenzialfaktoren subsummiert. Aus

7 Konzeption des Bewertungsmoduls

den Zeitwerten der Differenzdeckungsbeiträge ergeben sich durch Multiplikation mit dem Abzinsungsfaktor die Barwerte. Der Kapitalwert berechnet sich aus der Summe der monatlichen Nettozahlungen.

Zahlungszeitpunkt t (Ende des Monats)	Investitions- ausgaben I_0	Rückfluss R_t (Zeitwert)	Abzinsungs- faktor q^t für $i=0,12$	Netto- zahlungen (Barwert)	Kumulierte Barwerte der Netto- zahlungen
0	01.09.2004	-35.220,00		-35.220,00	-35.220,00
1	30.09.2004	3.880,00	0,9901	3.841,58	-31.378,42
2	31.10.2004	3.880,00	0,9803	3.803,55	-27.574,87
3	30.11.2004	3.880,00	0,9706	3.765,89	-23.808,98
4	31.12.2004	9.550,00	0,9610	9.177,36	-14.631,62
5	31.01.2005	9.550,00	0,9515	9.086,50	-5.545,12
6	28.02.2005	9.550,00	0,9420	8.996,53	3.451,41
7	31.03.2005	9.550,00	0,9327	8.907,46	12.358,87
8	30.04.2005	9.550,00	0,9235	8.819,26	21.178,14
9	31.05.2005	9.550,00	0,9143	8.731,95	29.910,08
10	30.06.2005	9.550,00	0,9053	8.645,49	38.555,57
11	31.07.2005	9.550,00	0,8963	8.559,89	47.115,46
12	31.08.2005	9.550,00	0,8874	8.475,14	55.590,60
Kapitalwert = Summe der Barwerte der monatlichen Nettozahlungen					55.590,60

Tabelle 10: Ermittlung des Kapitalwerts auf der Basis der Differenzdeckungsbeiträge

Die Festlegung eines geeigneten Planungszeitraums ist abhängig von der Volatilität der Marktentwicklung. Zur Beurteilung des Investitionsrisikos bzw. zur Sensitivitätsanalyse wird häufig die Amortisationsrechnung verwendet (GROB 1994, S. 104). „Zielsetzung der Amortisationsrechnung ist die Ermittlung des Zeitpunktes, in dem die Summe der erwarteten Aufwendungen ... gleich der Summe der voraussichtlichen Erträge ... ist“ (PERRIDON & STEINER 1993, S. 53). Die Bestimmung der Amortisationsdauer T_d wird mit Hilfe der Bedingungen

$$\sum_{t=0}^{[T_d]-1} R_t \cdot q^{-t} - I_0 = C_0 ([T_d] - 1) < 0 \quad (27)$$

$$\sum_{t=0}^{[T_d]} R_t \cdot q^{-t} - I_0 = C_0 ([T_d]) \geq 0 \quad (28)$$

bestimmt. In dem Beispiel (Tabelle 10) wird das eingesetzte Kapital zuzüglich der Verzinsung bereits nach sechs Monaten aus den Rückflüssen wieder gewonnen.

Die Auswahl einer Strukturalternative hängt von der Marktdynamik und der Erwartungshaltung des Planers hinsichtlich der Marktentwicklung ab. Je nach Prog-

nostizierbarkeit des Produktionsprogramms kann die Gewichtung zwischen der Höhe des Kapitalwerts und der Amortisationsdauer unterschiedlich ausfallen. Bei hoher Markt- bzw. Prognoseunsicherheit ist unter Umständen ein Strukturszenario mit geringerem Kapitalwert, aber kürzerer Amortisationsdauer aufgrund geringerer Anfangsinvestitionen einer Strukturalternative mit höherem Kapitalwert bei längerer Amortisationszeit vorzuziehen.

8 Anwendung der Methodik

Die vorgestellte Methodik zur Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen soll nicht im Zustand eines theoretischen Gedankenmodells verbleiben. Vielmehr ist es Ziel dieser Arbeit, den Einsatz in der betrieblichen Praxis durch eine anwendungsorientierte Konzeption des Lösungsvorgehens zu unterstützen. Die in den vorigen Kapiteln erarbeiteten Module der Planungssystematik verwenden ausschließlich Daten, die größtenteils bereits in betrieblichen Softwaresystemen abrufbar sind oder sich einfach in bestehende Systeme integrieren lassen.

Im Folgenden wird zunächst die ablauf- und aufbauorganisatorische Einbindung der Planungsmethodik beschrieben. Im Anschluss wird ein Softwareprototyp zur Anwendungsunterstützung vorgestellt, der in Kooperation mit der FAUSER AG, ein mittelständisches Softwareunternehmen und Anbieter von PPS- bzw. ERP-Systemen, umgesetzt wurde. Den Abschluss dieses Kapitels bildet eine Nutzenbewertung der vorgestellten Planungsmethode.

8.1 Ablauf- und aufbauorganisatorische Einbindung der Planungsmethodik

Wesentliches Ziel der Planungsmethodik ist die kontinuierliche Adaption des Produktionssystems an veränderte Marktbedingungen. Dadurch wird gleichzeitig eine Anpassung der Kostenstruktur erreicht, die zu einer Verbesserung der wirtschaftlichen Effizienz führt. Der zeitliche Horizont bei der Planung von Rekonfigurationsprozessen orientiert sich daher an den erwarteten Marktschwankungen.

In Abhängigkeit der Volatilität der Marktentwicklung kann das Planungsintervall sinnvoller Weise zwischen sechs und 24 Monaten liegen. Unterhalb dieser Grenze ist eine kontinuierliche Anpassung der Produktionsstruktur schon aufgrund der rechtlichen Bindungsfristen kaum möglich. Darüber hinaus erscheint eine wirtschaftliche Strukturadaption in kürzeren Zeiträumen aufgrund der entstehenden Rekonfigurationskosten nicht realisierbar. Kann die Marktentwicklung über einen Zeitraum von mehr als 24 Monaten als ausreichend konstant angesehen werden, genügt eine stichprobenartige Bewertung der Produktionseffizienz, die in der Regel in Form des Jahresabschlusses ohnehin durchgeführt wird. Die Einbindung der Planungsmethodik zur Identifikation des Bedarfs einer Strukturadaption in die Unternehmensprozesse kann unter diesen Voraussetzungen als überflüssig

angesehen werden. Dennoch ist in diesem Zusammenhang die Vorgehensweise zur Planung und Bewertung von Strukturalternativen weiterhin relevant.

Auf der Grundlage der Planungsmethodik wird eine Integration von Fabrikplanung und Produktionssteuerung erreicht (Abbildung 46). Dabei erweitert sich der Aufgabenbereich der Produktionssteuerung um die kontinuierliche Überwachung des Produktionssystems im Sinne eines Struktur-Controllings, mit dem Ziel, trendartige Abweichungen und deren Auswirkungen auf den Kapazitätsbedarf zu identifizieren. Mit Hilfe von PPS-Systemen werden die operativen zeitlichen und mengenmäßigen Vorgänge im Produktionsbereich in der Regel auf Wochenbasis vorgeplant. Allerdings beschränkt sich der Einfluss auf die Optimierung von Produktionsabläufen. Eingriffe in die Produktionsstruktur erfolgen bisher nur im Rahmen umfassender Fabrikplanungsprojekte, die üblicherweise durch singuläre Ereignisse wie z.B. Fabrikerweiterungen oder Produktionsverlagerung angeregt werden, und finden daher eher in langfristigen Zeitintervallen statt. Die Planung kontinuierlicher Rekonfigurationsprozesse ist dazwischen angesiedelt und schließt damit die Lücke zwischen Produktionssteuerung und herkömmlicher Fabrikplanung.

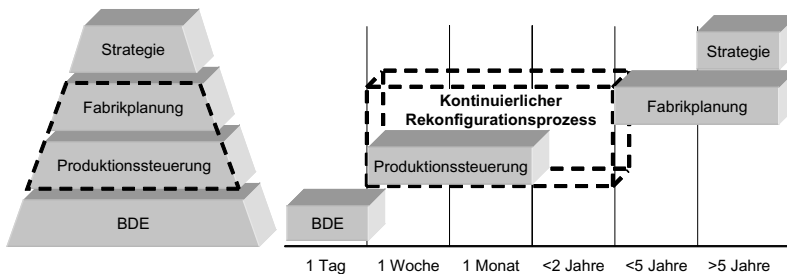


Abbildung 46: Zeitliche Einordnung von Rekonfigurationsprozessen auf der Ebene von Produktionsstrukturen

Im Mittelpunkt steht die aufwandsarme Erstellung und Bewertung von Strukturalternativen als Entscheidungsgrundlage für die Geschäftsführung. Die Methode stellt eine erweiterte Grobplanung dar, die den Rekonfigurationsprozess hinreichend genau abbildet, um aussagekräftige Informationen hinsichtlich der Kostensequenzen einer Investitionsentscheidung zu erhalten.

Aufgrund der Planungshäufigkeit ist es notwendig, dass die Entscheidungsvorbereitung von einzelnen bzw. wenigen Personen in sehr kurzer Zeit mit Hilfe einer geeigneten Anwendungsunterstützung (vgl. Abschnitt 8.2) durchgeführt werden

kann. Die Wichtigkeit einer interdisziplinären Zusammenarbeit bei Fabrikplanungsprojekten wird in diesem Zusammenhang nicht angezweifelt. Jedoch erscheint die Zusammenstellung eines funktionsübergreifenden Projektteams zur Feinplanung erst angebracht, nach dem ein Grobentwurf und dessen ökonomische Sinnhaftigkeit konzeptionell entwickelt wurden. Abbildung 47 zeigt den Ablauf von Rekonfigurationsprozessen noch einmal im Überblick.

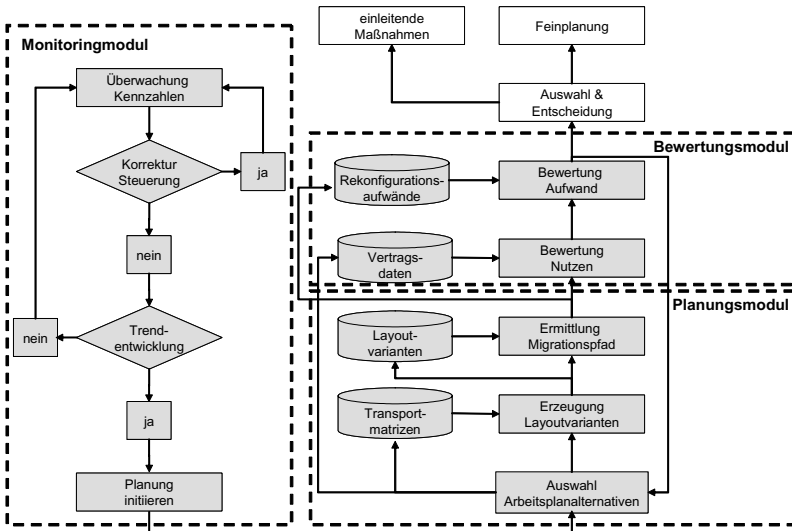


Abbildung 47: Ablauf von Rekonfigurationsprozessen

8.2 Entwicklung eines prototypischen DV-Hilfsmittels zur Anwendungsunterstützung

Bei der praxeologischen Realisierung der vorgestellten Methodik stand die rechnerbasierte Umsetzung des Layoutplanungsprozesses im Fokus. In Kooperation mit der FAUSER AG wurde ein prototypisches DV-Hilfsmittel zur Anwendungsunterstützung entwickelt und das vorgeschlagene Lösungskonzept validiert.

Als Folge der angestrebten Integration von Fabrikplanung und Produktionssteuerung bauen die erweiterten Planungsfunktionalitäten zur Layouterstellung auf einem bestehenden PPS-System auf. Dadurch lassen sich die bereits hinterlegten Stammdaten zu Betriebsmitteln, Personal, Arbeitsplänen, Schichtmodellen und

Produktionsprogramm für das Planungsmodul weiter nutzen. Als Entwicklungsumgebung diente MS Visual Basic.

Die in Abschnitt 5.1 beschriebenen Kennzahlen sind im bestehenden PPS-System der FAUSER AG bereits verfügbar und werden mittels eines SQL-Servers zur weiteren Auswertung in Standardprogramme zur Tabellenkalkulation übertragen. In ähnlicher Form erfolgt das Auslesen der Arbeitsplan- und Produktionsprogramminformationen, die im Rahmen der Kapazitätsberechnung und der Auswahl geeigneter Arbeitsplankombinationen verarbeitet werden (vgl. Abschnitt 6.1.1).

Für die Bewertung der kostenseitigen Auswirkungen von Rekonfigurationsprozessen ist eine Erweiterung der Stammdaten um die potenzialfaktorspezifischen Vertragsinformationen notwendig (vgl. Abschnitt 7.1.2.1). Die positiven Kosteneffekte einer Strukturanpassung können über die Vertragsdaten mit Hilfe der Tabellenkalkulation direkt nachgewiesen werden.

Bevor die Anpassung des Produktionslayouts erfolgen kann, müssen zunächst die Ressourcen des Produktionssystems sowie die flächenbezogenen Charakteristika der Fabrik im Planungswerkzeug abgebildet werden. Bei der geometrischen Beschreibung der Betriebsmittel lassen sich Maschinenaufstandsfläche, Ein- und Ausgangspuffer sowie Bedienerflächen unterscheiden (Abbildung 48). Die verwendete Gitternetzdarstellung erlaubt eine Bedienbarkeit wie bei kommerziellen Grafikprogrammen und erhöht damit die Benutzerfreundlichkeit. Unabhängig von der resultierenden Flächenform werden Betriebsmittel für die Berechnung als Rechtecke approximiert.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit verwendet die Hallenplanfunktion verschiedene Ebenen (Layer) zur Darstellung des Layouts. Die Layertechnik ermöglicht z.B. das Einlesen von Digitalbildern oder CAD-Zeichnungen der zu planenden Halle in die unterste Ebene. Auf einer weiteren Ebene lassen sich Hallenbereiche und Hauptverkehrswege für die innerbetriebliche Logistik definieren. Im Falle einer manuellen Planung können Objekte (Ressourcen) über eine Werkzeugleiste (Toolbox) per Drag&Drop-Verfahren auf den Flächen frei positioniert werden.

Die Positionierung der Betriebsmittel beruht auf dem in Abschnitt 6.1.2 vorgestellten zweistufigen genetischen Algorithmus mit dem Ziel, die Transportintensitäten zu minimieren. Zunächst bildet die Optimierungsfunktion Betriebsmittelgruppen und weist diese den zuvor definierten Hallenbereichen zu. Im Anschluss werden die Betriebsmittel innerhalb einer Gruppe exakt positioniert. Aufgrund

8.2 Entwicklung eines prototypischen DV-Hilfsmittels zur Anwendungsunterstützung

der zum Teil langen Rechenzeiten kann der Anwender jederzeit die Optimierung unterbrechen, wenn keine signifikante Verbesserung (horizontaler Verlauf der Zielfunktion) mehr eintritt (Abbildung 49).

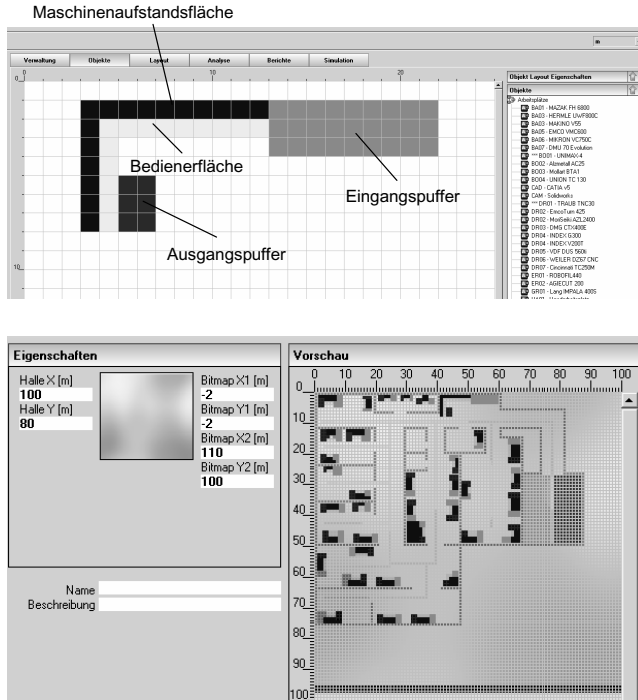


Abbildung 48: Geometrische Beschreibung von Betriebsmitteln und Fabrikhallen mit Hilfe des entwickelten prototypischen DV-Hilfsmittels

Das Ergebnis der Layoutplanung bzw. deren Auswirkung auf die Materialflüsse wird in Form eines Sankey-Diagramms ausgewiesen, bei dem die Dicke der Materialflusspfeile den Transportvorgängen entspricht. Darüber hinaus unterstützt diese Darstellung den Anwender bei der Durchführung manueller Eingriffe in das Produktionslayout, indem die Konsequenzen von Positionsveränderungen auf den Materialfluss direkt angezeigt werden.

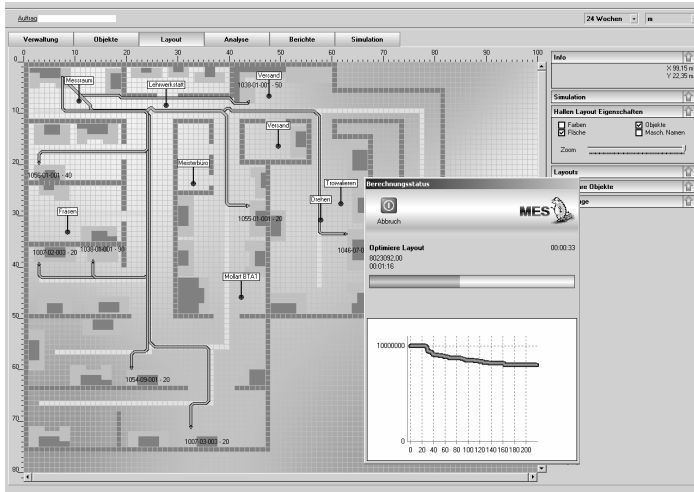


Abbildung 49: Optimierung der Betriebsmittelanordnung mit genetischen Algorithmen durch Anwendung des prototypischen DV-Hilfsmittels

Um die statische Kapazitätsplanung und die Nutzung der Logistikressourcen zu validieren, ist eine Ablaufsimulation an das Planungswerkzeug angebunden. Die Simulation des Auftragsdurchlaufs erfolgt auf der Basis des Produktionsprogramms, der zugewiesenen Arbeitspläne und des optimierten Produktionslayouts für einen zuvor festgelegten Zeitraum. Die grafische Präsentation der Simulationsergebnisse ermöglicht es dem Anwender, detaillierte und übersichtliche Informationen über Liefertreue, Durchlaufzeiten, Ressourcennutzung und Kosten zu erlangen (Abbildung 50). Unter Umständen ist unter dynamischen Gesichtspunkten eine Anpassungen bei der Kapazitätsbestimmung bzw. Ressourcenzuordnung vorzunehmen und eine Neuplanung des Layouts anzustoßen.

Während der Entwicklung des DV-Prototyps wurden bereits frühzeitig potenzielle Anwender eingebunden, um die Praxistauglichkeit im betrieblichen Einsatz sicherzustellen. Aufgrund der befriedigenden Lösungsergebnisse bei ersten Anwendungsversuchen in Zusammenarbeit mit einem mittelständischen Automobilzuliefererbetrieb ist die Weiterentwicklung des Prototyps zur Marktreife durch die FAUSER AG geplant. Das Funktionsschema ist noch in Abbildung 51 dargestellt.

8.2 Entwicklung eines prototypischen DV-Hilfsmittels zur Anwendungsunterstützung

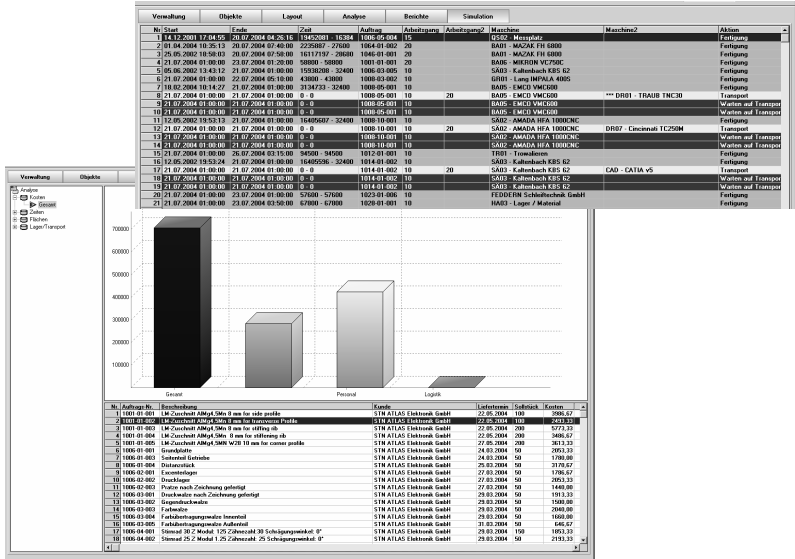


Abbildung 50: Benutzeroberfläche des prototypischen DV-Hilfsmittels zur Visualisierung der Simulationsergebnisse

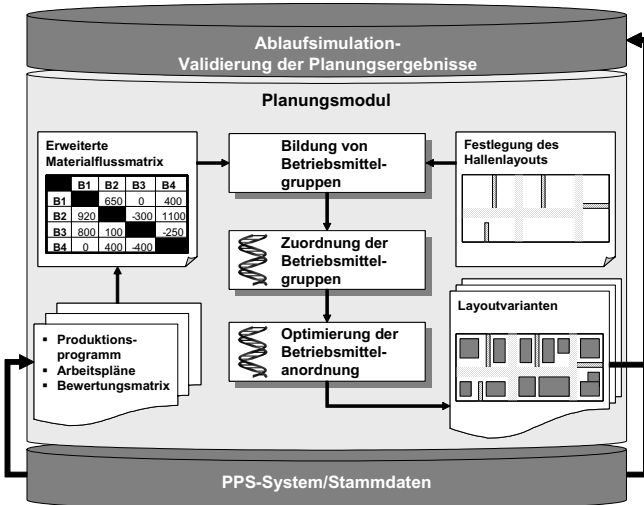


Abbildung 51: Ablauf der Layoutplanung im prototypischen DV-Hilfsmittel

8.3 Kritische Würdigung

Der steigende Automatisierungs- und Integrationsgrad bei Fertigungsprozessen lässt den Anteil der Fixkosten im produzierenden Gewerbe stetig steigen (WILDEMANN 1990, S. 58; SIEGWART & RAAS 1991, S. 42; KALUZA 1994, S. 395). Vor dem Hintergrund dieser Entwicklung ergibt sich grundsätzlich ein hohes Einsparungspotenzial, indem die Kostenstruktur durch die temporäre Anpassung der Produktionskapazitäten an die aktuellen Marktbedürfnisse positiv beeinflusst wird. Der Bedarf zur kontinuierlichen Beurteilung und ggf. Anpassung der Produktionsstruktur wird in der Fachwelt einhellig bestätigt (vgl. Kapitel 1 und 2). Eine monetäre Bewertung des Methodeneinsatzes ist aufgrund der Abhängigkeit von z.B. Unternehmensgröße, Anzahl und Komplexität der Produkte, Kostenstruktur etc. jedoch nur unternehmensspezifisch sinnvoll. Die Planungsmethodik soll daher anhand der in Abschnitt 4.1 definierten Anforderungen kritisch beurteilt werden.

Die Methode kann innerhalb des definierten Untersuchungsbereichs (vgl. Abschnitt 2.1) als allgemeingültig und übertragbar angesehen werden, da über die Spezifikation betrachteter Unternehmen hinaus keinerlei Einschränkungen vorgegeben wurden. Die bei der Planung von Rekonfigurationsprozessen zusätzlich erforderlichen Informationen bezüglich der Veränderungsfähigkeit von Kapazitäten unter Berücksichtigung zeitlicher Bindungsfristen oder Vorlaufzeiten werden in Form von Vertragsdatenbanken repräsentiert und zur weiteren Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Die notwendigen Daten zur Bestimmung des Rekonfigurationsaufwands wurden ebenfalls identifiziert und in die Systemumgebung integriert.

Die Identifikation des Anpassungsbedarfs wurde auf die Analyse weniger struktureller Kennzahlen zurückgeführt. Damit lässt sich eine kontinuierliche und gleichzeitig unkomplizierte Überwachung der Struktureffizienz gewährleisten. Die Auswirkungen einzelner Anpassungsmaßnahmen sind sowohl bei der Planung der Strukturalternativen als auch bei der Kostenbewertung ganzheitlich berücksichtigt. Für die Layoutplanung besteht ein rechnergestütztes Verfahren, das den Planungsprozess zum einen wesentlich beschleunigt und zum anderen dem Planer weiterhin die Möglichkeit zur Beeinflussung des Planungsergebnisses bietet. Das ausgewählte Kostenverfahren ist in der Lage, die finanziellen Konsequenzen von Kapazitätsanpassungen verursachungsgerecht aufzuzeigen. Dabei wird zusätzlich der Aufwand bei der Strukturmigration beurteilt und dem wirtschaftlichen Nutzen gegenübergestellt.

	Monitoringmodul	Planungsmodul	Bewertungsmodul
Beschreibung rekonfigurationsrelevanter Informationen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Identifikation strukturelevanter Kennzahlen	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ableitung des Bedarfs zur Strukturanpassung	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ganzheitliche Betrachtung bei der Lösungssuche	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Ganzheitliche Betrachtung bei der Kostenbewertung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Beschleunigung des Planungsprozesses durch Rechnerunterstützung	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Beeinflussbarkeit des Planungsergebnisses	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Verursachungsgerechte Kostenzuordnung	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Berücksichtigung des Rekonfigurationsaufwands	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

Abbildung 52: Durch die konzeptionierten Module gewährleistete Anforderungserfüllung im Sinne der Aufgabenstellung

Aus der Erfüllung dieser Anforderungen durch die konzeptionierten Module (Abbildung 52) kann qualitativ der Nutzen durch den Methodeneinsatz abgeleitet werden. An erster Stelle ist hier die Verkürzung der Planungszeit zu nennen. Aufgrund der Verlagerung der Planungstätigkeit von der Lösungssuche zur Lösungsbewertung kann der Planungsaufwand entscheidend reduziert werden. Die Anwendungsunterstützung durch ein rechnerbasiertes Planungswerkzeug verstärkt diesen Effekt zusätzlich. Da bedingt durch die zunehmende Turbulenz im Unternehmensumfeld mit einer weiteren Verkürzung der Planungsintervalle zu rechnen ist (WESTKÄMPER et al. 1997), gewinnt dieser Aspekt noch mehr an Bedeutung. Die Beschränkung auf die wesentlichen strukturelevanten Planungsdaten erhöht die Transparenz und Nachvollziehbarkeit bei der Lösungssuche. Insgesamt erlaubt die Durchgängigkeit der Planungssystematik eine aussagekräftige quantitative Bewertung der Kostenkonsequenzen im Rahmen einer erweiterten Grobplanung und damit bereits in einer frühen Phase des gesamten Planungsprozesses (einschl. Feinplanung). Vor dem Hintergrund, dass die softwareprototypische Umsetzung durch die FAUSER AG aufgrund bisheriger Reaktionen der Anwendungspartner zur Marktreife weiterentwickelt wird, kann die Akzeptanz in der betrieblichen Praxis als gegeben angesehen werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Unternehmen sind heute zunehmend gezwungen, sich auf stark schwankende und nur schwer prognostizierbare Marktbedingungen einzustellen. Gerade in fixkostenintensiven Produktionsbetrieben erzeugt dieser Umstand ein Spannungsfeld zwischen Kapazitätsangebot und Marktanforderungen. Bei einer volatilen Marktentwicklung kann eine einmal optimierte Produktionsstruktur nur temporär einen effizienten Betriebszustand erreichen. Eine kontinuierliche Anpassung der Produktionsstrukturen an veränderte Marktanforderungen bildet das Ausgangsproblem der vorliegenden Arbeit.

Die Untersuchung bestehender Ansätze in der Fachwelt hat gezeigt, dass bereits zahlreiche Lösungsvorschläge zu dieser Problematik existieren. Dies unterstreicht die Relevanz der formulierten Aufgabenstellung. Allerdings konzentriert sich die Mehrzahl der Lösungsvorschläge auf einzelne Teilbereiche der Problemstellung. Zielsetzung dieser Arbeit war daher die Entwicklung einer durchgängigen Planungssystematik von der Identifikation des Bedarfs zur Strukturadaption über die Planung von Strukturalternativen bis hin zur monetären Bewertung der Auswirkung ihrer Umsetzung.

Die Realisierung dieser Zielsetzung erfolgte in drei Schritten. Mit dem Monitoringmodul wurde ein Instrument geschaffen, das die Analyse der Konsequenzen von Produktionsprogrammentwicklungen auf die Effizienz der Produktionsstruktur ermöglicht. Auf der Basis der beiden Oberkennzahlen Liefertreue und Stückkosten wurde unter Berücksichtigung der durchlaufzeitbestimmenden Zeitanteile und Kapazitätsauslastungen ein leistungs- und kostenorientiertes Kennzahlensystem aufgebaut. Dabei wurde bewusst auf die Erhebung von Daten, die vornehmlich durch die Produktionssteuerung (z.B. Auftragsreihenfolge, Losgröße) determiniert werden, verzichtet. Die Fokussierung auf strukturelevante, d.h. durch die Produktionsstruktur beeinflussbare Maßgrößen, erlaubt eine einfache Handhabung und Interpretation des Kennzahlensystems. Auftretende Effizienzabweichungen werden den Stückzahlentwicklungen gegenübergestellt. Basierend auf einer Korrelationsanalyse können auf diese Weise marktbedingte Trends von kurzfristigen Leistungsschwankungen unterschieden werden.

Die Planung von Rekonfigurationsprozessen ist in zwei Phasen gegliedert. Im Partialmodul Optimierung werden zunächst abhängig von den Kapazitätsanforderungen Arbeitsplanalternativen erzeugt und ausgewählt. Dabei werden bereits geplante Kapazitätserweiterungen bzw. -reduzierungen mitberücksichtigt. Die

ausgewählten Arbeitsplankombinationen bilden die Basis für die anschließende Layoutplanung. Veränderungen der Kapazitätsstruktur werden in Vertragsdatenbanken zusammengefasst und für die spätere monetäre Bewertung zur Verfügung gestellt.

Die Layoutplanung erfolgt nach einem zweistufigen genetischen Algorithmus. Damit wird die Planungskomplexität reduziert und der beherrschbare Lösungsraum erweitert. Gleichzeitig erlaubt der zweistufige Ansatz die Berücksichtigung zahlreicher realitätsnaher Randbedingungen wie z.B. die Festlegung von Verkehrswegen. Die Ergebnisse der Layoutplanung werden mit Hilfe des entwickelten Softwareprototyps direkt in eine Ablaufsimulation übergeben. Damit lassen sich auch dynamische Aspekte bei der Kapazitätsbelastung, speziell im Logistikbereich, untersuchen und für die weitere Kostenbewertung aufbereiten.

Neben der Optimierung der Produktionsstruktur hat auch der Migrationspfad bei der Umsetzung einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit einer Strukturalternative. Daher wurde im Rahmen des Partialmoduls Umsetzung ein Algorithmus zur Bestimmung einer zeitoptimierten Migrationsphase entwickelt. Die Umsetzungsreihenfolge wirkt sich direkt auf mögliche Produktionsunterbrechungen aus, deren Kompensation zu außerordentlichen Aufwendungen führt. Gemeinsam mit den statischen Aufwendungen für die eigentliche Verlagerung von Betriebsmitteln werden die sich daraus ergebenden Kosten als Rekonfigurationsaufwände bei der Strukturbewertung mitberücksichtigt.

Die Konzeption des Bewertungsmoduls dient der Evaluierung von Strukturalternativen. Auf der Grundlage einer kapazitätsorientierten Kostenrechnung werden durch Kapazitätsanpassungen bedingte Zahlungsstromveränderungen unter Berücksichtigung rechtlicher Bindungsfristen und Vorlaufzeiten in Form von Vertragsdatenbanken erfasst und ausgewertet. Die Kostenvorteile werden über eine Differenzdeckungsbeitragsrechnung ermittelt. Aus der Gegenüberstellung mit einmaligen Aufwendungen (Anschaffungszahlungen, Verkaufserlöse, Rekonfigurationsaufwände) lässt sich der monetäre Nutzen einer Strukturalternative ableiten und mit den Rentabilitätsvorgaben des Unternehmens vergleichen, um daraus eine Entscheidung über die Weiterverfolgung eines Strukturszenarios zu treffen.

Ein wesentlicher Nutzen dieser Arbeit ist die Verlagerung der planerischen Tätigkeit von der Lösungssuche hin zur Lösungsbewertung. Damit sind mit geringem Aufwand bereits in einer frühen Planungsphase realistische Aussagen zu

den finanziellen Konsequenzen von Anpassungsentscheidungen möglich. Die Anwendung der Methodik wurde durch die Entwicklung eines prototypischen Rechnerhilfsmittels weiter unterstützt. Die positive Resonanz der Anwendungspartner hat dazu geführt, dass der Softwareprototyp durch die Firma FAUSER AG zur Marktreife gebracht werden wird. In diesem Zusammenhang werden auch die Auswertungsrechnungen weiter integriert.

Die fortschreitende technische Entwicklung wird durch zunehmende Modularisierung und Standardisierung zu mehr Flexibilität beim Einsatz der Produktionseinrichtung führen. Die vorgestellte Planungssystematik blendet die Skalierbarkeit von Kapazitäten einzelner Betriebsmittel bisher aus. Es ist daher denkbar, zukünftig die Beschreibung von Vertragsverhältnissen um unterschiedliche Kapazitätsstufen von Betriebsmitteln zu erweitern. In Abhängigkeit potenzieller Kapazitätsstufen ließe sich auch die Kapazitätsplanung und damit die Auswahl von Arbeitsplanalternativen weiter unterstützen, um den gestiegenen Planungsaufwand entgegen zu wirken. Durch die Berücksichtigung dieser beiden Aspekte könnte der Nutzen des Methodeneinsatzes weiter gesteigert werden.

Moderne organisationstheoretische Ansätze, die mit Begriffen wie „Virtuelle Unternehmen“, „Zeltorganisation“ oder „Fluide Organisation“ heute mitunter noch recht diffus skizziert werden (DAVIDOW & MALONE 1992, SCHUH et al. 1998, GARRECHT 2002, PINCZOLITS 2003, WEBER 1996a), verlangen in ihrer künftigen praxeologischen Umsetzung durchgehend erhöhte Wandlungsfähigkeit, vornehmlich auch in der Produktionswirtschaft, wodurch das vorliegende Konzept eine besondere Zukunftsrelevanz erhält.

10 Literaturverzeichnis

ADAM 1996

Adam, D.: Planung und Entscheidung. 4. Aufl. Wiesbaden: Gabler 1996.

AGGTELEKY 1990a

Aggteleky, B.: Fabrikplanung - Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung. Band 1: Grundlagen - Zielplanung - Vorarbeiten. 2. Aufl. München: Hanser 1990.

AGGTELEKY 1990b

Aggteleky, B.: Fabrikplanung: Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung, Band 2: Betriebsanalyse und Feasibility-Studie. 2. Aufl. München: Hanser 1990.

AGHTE 1959

Aghte, K.: Stufenweise Fixkostendeckung im System des Direct Costing. ZfB 29 (1959) 7, S. 404-418.

BALAKRISHNAN & CHENG 1998

Balakrishnan, J.; Cheng, C. H.: Dynamic Layout Algorithms: a State-of-the-art Survey. International Journal of Management Science 26 (1998) 4, S. 507-521.

BECKER et al. 1997

Becker, K.; Rukwied, A.; Wilde, J.; Zweig, B. W.: Life-Cycle-Cost-Betrachtungen von Oberleitungsanlagen. In: Systemoptimierung im spurgeführten Verkehr; München 25./26. September. Düsseldorf: VDI-Verlag 1997, S. 199-209. (VDI-Berichte 1344).

BIERGANS 1973

Biergans, E.: Investitionsrechnung: Verfahren der Investitionsrechnung und ihre Anwendung in der Praxis. Nürnberg: Carl 1973.

BLOHM & LÜDER 1995

Blohm, H.; Lüder, K.: Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung. 8. Aufl. München: Vahlen 1995.

BOGATZKI 1998

Bogatzi, A.: Fabrikplanung: Verfahren zur Optimierung der Maschinenaufstellung. Diss. Universität Wuppertal (1998). Regensburg: Roderer 1998. (Theorie und Forschung 534).

BRIEL 2002

Briel, R. v.: Ein skalierbares Modell zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Anpassungsinvestitionen in ergebnisverantwortlichen Fertigungssystemen. Diss. Universität Stuttgart (2002). Heimsheim: Jost Jetter 2002. (IPA-IAO Forschung und Praxis 352).

BURKARD & BONNIGER 1983

Burkard, R. E.; Bonniger, T.: A heuristic for quadratic boolean problems with applications to quadratic assignment problems. *European Journal of Operations Research* 13 (1983) 4, S. 374-386.

BÜRKELER 1977

Bürkeler, A.: Kennzahlensystem als Führungsinstrument. Diss. ETH Zürich (1977).

CHIANG 2001

Chiang, W.-C.: Visual facility layout design system. *International Journal of Production Research* 39 (2001) 9, S. 1811-1836.

CISEK et al. 2002

Cisek, R.; Habicht, C.; Neise, P.: Gestaltung wandlungsfähiger Produktionssysteme. *ZWF* 97 (2002) 9, S. 441-445.

COENENBERG 1999

Coenenberg, A. G.: *Kostenrechnung und Kostenanalyse*. 4. Aufl. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1999.

COSTEN 1995

Costen, H. (Hrsg.): *Lexikon der Betriebswirtschaftslehre*. 3. Aufl. München: Oldenbourg 1995.

DAENZER & HUBER 1997

Daenzer, W. F.; Huber, F.: *Systems Engineering - Methodik und Praxis*. Zürich: Industrielle Organisation 1997.

DAVIDOW & MALONE 1992

Davidow, W.; Malone, M.: *The virtual corporation: structuring and revitalizing the corporation for the 21st century*. New York: Harper Business 1992.

DIN 19226-1

DIN 19226-1: *Leittechnik; Regelungstechnik und Steuerungstechnik; Allgemeine Grundbegriffe*. Berlin: Beuth 1994.

DOHMS 2001

Dohms, R.: Methodik zur Bewertung und Gestaltung wandlungsfähiger, dezentraler Produktionssysteme. Diss. RWTH Aachen (2001). Aachen: Shaker 2001. (Berichte aus der Produktionstechnik 11/2001).

DOMSCHKE 1975

Domschke, W.: Modelle und Verfahren zur Bestimmung betrieblicher und inner-betrieblicher Standorte - ein Überblick. Zeitschrift für Operations Research 19 (1975), S. B13-B41.

DOMSCHKE 1990

Domschke, W.: Logistik: Rundreisen und Touren. 3. Aufl. München: Oldenbourg 1990.

DOMSCHKE & DREXL 2002

Domschke, W.; Drexl, A.: Einführung in Operations Research. 5. Aufl. Berlin: Springer 2002.

DORIGO et al. 1996

Dorigo, M.; Maniezzo, V.; Colomi, A.: The ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 1 (1996) 26, S. 29-41.

DRUCKER 1991

Drucker, P. F.: So funktioniert die Fabrik von morgen. Harvard Manager (1991) 1, S. 9-17.

DUNKER et al. 2003

Dunker, T.; Radons, G.; Westkämper, E.: A coevolutionary algorithm for a facility layout problem. International Journal of Production Research 41 (2003) 15, S. 3479-3500.

EHMANN 1993

Ehmann, B.: Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg (1993). München: Hanser 1993. (Fertigungstechnik Erlangen 35).

EVERSHEIM 1992

Eversheim, W.: Flexible Produktionssysteme. In: Frese, E. (Hrsg.): Handwörterbuch der Organisation. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1992, S. 2058ff.

FISCHER 1997

Fischer, J.: Einsatzmöglichkeiten zeitorientierter Vertragsdatenbanken im Controlling. *Wirtschaftsinformatik* 39 (1997) 1, S. 55-63.

FÖRSTER et al. 2001

Förster, A.; Wirth, S.; Gäse, T.: Integrative modulare Produktionssystemplanung - Ein neuer methodischer Ansatz der rechnergestützten Planung. *wt Werkstattstechnik* 91 (2001) 4, S. 221-228.

FOULDS & ROBINSON 1978

Foulds, L. R.; Robinson, D. F.: Graph theoretic heuristics for the plant layout problem. *International Journal of Production Research* 16 (1978) 1, S. 27-37.

FRANZ 1992

Franz, K.-P.: Moderne Methoden der Kostenbeeinflussung. In: Männel, W. (Hrsg.): *Handbuch Kostenrechnung*. Wiesbaden: Gabler 1992, S. 1492-1505.

FRIEDRICH 1996

Friedrich, S. A.: Outsourcing: Wie strategische Fehler vermieden werden können. *io management* 65 (1996) 9, S. 70-74.

GARCES-PEREZ et al. 1996

Garces-Perez, J.; Schoenefeld, D. A.; Wainwright, R. L.: Solving facility layout problems using genetic programming. In: *Proceedings of the 1st Annual Conference on Genetic Programming (GP-96)*. 1996, S. 182-190.

GARRECHT 2002

Garrecht, M.: *Virtuelle Unternehmen: Entstehung, Struktur und Verbreitung in der Praxis*. Diss. Technische Universität Dresden (2001). Frankfurt: Lang 2002. (Europäische Hochschulschriften: Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft 2885).

GAUSEMEIER et al. 1996

Gausemeier, J.; Fink, A.; Schlake, O.: *Szenario-Management: Planen und Führen mit Szenarien*. 2. Aufl. München: Hanser 1996.

GLASER 1992

Glaser, H.: Prozesskostenmanagement - Darstellung und Kritik. *Zeitschrift für betriebswirtschaftliche Forschung (ZfbF)* 44 (1992), S. 275-288.

GLOVER 1996

Glover, F.: Tabu search and adaptive memory programming - advances, applications and challenges. In: Barr, R. et al. (Hrsg.): Interfaces in Computer Science and Operations Research. Boston: Kluwer 1996, S. 1-75.

GROB 1994

Grob, H. L.: Einführung in die Investitionsrechnung: eine Fallstudiengeschichte. 2. Aufl. München: Vahlen 1994.

GUPTA 1998

Gupta, J. C.: Marktinduziertes Ressourcen- und Kostenmanagement. Diss. RWTH Aachen (1997). Aachen: Shaker 1998. (Berichte aus der Produktionstechnik 17/1998).

HABERSTOCK 1986

Haberstock, L.: Kostenrechnung II. 7. Aufl. Hamburg: S+W 1986.

HAHN & KAUFMANN 1997

Hahn, D.; Kaufmann, L.: Maschinenstundensatzrechnung und Prozesskostenrechnung - Grundzüge und vergleichende Würdigung. In: Becker, W. et al. (Hrsg.): Kostenrechnung - Stand und Entwicklungsperspektiven. Wiesbaden: Gabler 1997.

HARARY 1972

Harary, F.: Graph theory. 3. Aufl. London: Addison - Wesley 1972.

HARHALAKIS et al. 1990

Harhalakis, G.; Nagi, R.; Proth, J. M.: An efficient heuristic in manufacturing cell formation for group technology applications. International Journal of Production Research 28 (1990) 1, S. 185-198.

HEIGL et al. 1989

Heigl, A.; Schmid, R.; Uecker, P.: Controlling - Interne Revision. 2. Aufl. Stuttgart: Teubner 1989.

HEINEN & DIETL 1991

Heinen, E.; Dietl, B.: Informationswirtschaft. In: Heinen, E. (Hrsg.): Industriebetriebslehre: Entscheidungen im Industriebetrieb. 9. Aufl. Wiesbaden: Gabler 1991, S. 889-1074.

HEISTERMANN 1994

Heistermann, J.: Genetische Algorithmen. Stuttgart: Teubner 1994. (Teubner-
Texte zur Informatik 9).

HENN & KÜHNLE 1996

Henn, G.; Kühnle, H.: Strukturplanung. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Be-
triebsstätte - Produktion und Management. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996.

HERNÁNDEZ MORALES 2003

Hernández Morales, R.: Systematik der Wandlungsfähigkeit in der Fabrikpla-
nung. Diss. Universität Hannover (2002). Düsseldorf: VDI-Verlag 2003. (Fort-
schritts-Berichte VDI Reihe 16, 149).

HORVÁTH 1992

Horváth, P.: Controlling. 4. Aufl. München: Vahlen 1992.

HUMMEL 1992

Hummel, S.: Die Forderung nach entscheidungsrelevanten Kosteninformatio-
nen. In: Männel, W. (Hrsg.): Handbuch Kostenrechnung. Wiesbaden: Gabler
1992, S. 76-96.

HUMMEL & MÄNNEL 1986

Hummel, S.; Männel, W.: Kostenrechnung. Band 1: Grundlagen, Aufbau und
Anwendung. 4. Aufl. Wiesbaden: Gabler 1986.

IHDE 1991

Ihde, G.: Transport - Verkehr - Logistik: gesamtwirtschaftliche Aspekte und
einzelwirtschaftliche Handhabung. 2. Aufl. München: Vahlen 1991.

IWATA et al. 1994

Iwata, K.; Onosato, M.; Koike, M.: Random Manufacturing Systems: A New
Concept of Manufacturing Systems for Production to Order. CIRP Annals 43
(1994) 1, S. 379-383.

JOSWIG-KÜHL et al. 1988

Joswig-Kühl, G.; Arentzen, U.; Damerau, K.: Gablers Wirtschaftslexikon. 12.
Aufl. Wiesbaden: Gabler 1988.

KALUZA 1994

Kaluza, B.: Kostenmanagement bei neuen Technologien. In: Dellmann, K. et
al. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen im Kostenmanagement. Bern: Haupt 1994,
S. 371-421.

KEMMINER 1999

Kemminer, J.: Lebenszyklusorientiertes Kosten- und Erlösmanagement. Diss. Universität Duisburg (1999). Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 1999. (Gabler Edition Wissenschaft: Markt- und Unternehmensentwicklung)

KERN 1962

Kern, W.: Die Messung industrieller Fertigungskapazitäten und ihrer Ausnutzung. Köln: Westdt. 1962.

KETTNER et al. 1984

Kettner, H.; Schmidt, J.; Greim, H.-R.: Leitfaden der systematischen Fabrikplanung. München: Hanser 1984.

KILGER 1993

Kilger, W.: Flexible Plankostenrechnung und Deckungsbeitragsrechnung. 10. Aufl. Wiesbaden: Gabler 1993.

KIM & KIM 2000

Kim, J. G.; Kim, Y. D.: Layout planning for facilities with fixed shapes and input and output points. International Journal of Production Research 38 (2000) 18, S. 4635-4653.

KLEINER 1991

Kleiner, F.: Kostenrechnung bei flexibler Automatisierung. Diss. Universität Stuttgart (1990). München: Vahlen 1991. (Controlling-Praxis).

KLIMKE 2002

Klimke, W.: Fabrikbauprojekte: Erfahrungen und Erkenntnisse aus einem Rückblick. In: Zäh, M. F. et al. (Hrsg.): Fabrikplanung 2002; München 20.06.2002. München: Utz 2002, S. 2.1-2.15. (Seminarberichte 63).

KNÖDLER 2000

Knödler, H.: Industrielle Kostenstrukturen im Wandel: eine empirische Untersuchung langfristiger Kostenstrukturveränderungen im produzierenden Gewerbe der Bundesrepublik Deutschland 1950 bis 1994. Berlin: VWF 2000.

KOESTLER 1967

Koestler, A.: The ghost in the machine. London: Hutchinson 1967.

KOOPMANS & BECKMANN 1957

Koopmans, T. C.; Beckmann, M.: Assignment problems and the location of economic activities. Econometrica 25 (1957) 1, S. 53-76.

KRIST 1983

Krist, H.: Der Investitionsentscheidungsprozess in Industriebetrieben. Berlin: Internationales Institut für Management und Verwaltung IIMV 1983. (Discussion Papers 83-36).

KROPFBERGER & MÖDRITSCHER 1999

Kropfberger, D.; Mödritscher, G.: Diffusionsprozesse von Managementmethoden und ihre Einflussfaktoren. In: Egger, A. et al. (Hrsg.): Managementinstrumente und -konzepte: Entstehung, Verbreitung und Bedeutung für die Betriebswirtschaftslehre. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1999, S. 259-287.

KRUSCHWITZ 1976

Kruschwitz, L.: Finanzmathematische Endwert- und Zinsfußmodelle. ZfB 46 (1976) 3, S. 245-262.

KÜPPER 1994

Küpper, H.-U.: Vergleichende Analyse moderner Ansätze des Gemeinkostenmanagements. In: Dellmann, K. et al. (Hrsg.): Neuere Entwicklungen im Kostenmanagement. Bern: Haupt 1994, S. 31-77.

KÜPPER & KNOOP 1974

Küpper, W.; Knoop, P.: Investitionsplanung. In: Müller, W. et al. (Hrsg.): Rationelle Betriebswirtschaftslehre: Nachschlagewerk für moderne betriebswirtschaftliche Entscheidungsmethoden. Neuwied: Luchterhand 1974.

KUPRAT 1991

Kuprat, T.: Simulationsgestützte Beurteilung der logistischen Qualität von Produktionsstrukturen. Diss. Universität Hannover (1991). Düsseldorf: VDI-Verlag 1991. (Fortschritts-Berichte VDI Reihe 2, 228).

KUSIAK & HERAGU 1987

Kusiak, A.; Heragu, S. S.: The facility layout problem. European Journal of Operational Research 29 (1987) 3, S. 229-251.

KÜTING 1983

Küting, K.: Grundsatzfragen von Kennzahlen als Instrument der Unternehmensführung. Wirtschaftswissenschaftliches Studium 12 (1983) 5, S. 237.

LACKSONEN 1997

Lacksonen, T. A.: Preprocessing for static and dynamic facility layout problems. International Journal of Production Research 35 (1997) 4, S. 1095-1106.

LACKSONEN & ENSCORE 1993

Lacksonen, T. A.; Enscore, E. E.: Quadratic assignment algorithms for the dynamic layout problem. *International Journal of Production Research* 31 (1993) 3, S. 503-517.

LABMANN 1968

Laßmann, G.: Die Kosten- und Erlösrechnung als Instrument der Planung und Kontrolle in Industriebetrieben. Düsseldorf: Stahleisen 1968.

LABMANN 1976

Laßmann, G.: Gestaltungsformen der Kosten- und Erlösrechnung im Hinblick auf Planungs- und Kontrollaufgaben. In: Coenenberg, A. G. (Hrsg.): Unternehmensrechnung: betriebliche Planungs- und Kontrollrechnungen auf der Basis von Kosten und Leistungen. München: Vahlen 1976.

LABMANN 1983

Laßmann, G.: Betriebsmodelle. In: Chmielewicz, K. (Hrsg.): Entwicklungslinien der Kosten- und Erlösrechnung. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1983, S. 87-108.

LEE 1998

Lee, G. H.: Designs of components and manufacturing systems for agile manufacturing. *International Journal of Production Research* 36 (1998) 4, S. 1023-1044.

LOEPER 1995

Loeper, S.: Kennzahlengestütztes Beratungssystem zur Verbesserung der Logistikleistung in der Werkstattfertigung. Diss. Universität Karlsruhe (1995). Karlsruhe: wbk 1995. (Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik 63).

LÜCKE 1955

Lücke, W.: Investitionsrechnung auf der Grundlage von Ausgaben oder Kosten? *Zeitschrift für handelswissenschaftliche Forschung* 7 (1955), S. 310-324.

MANIEZZO & COLORNI 1999

Maniezzo, V.; Colorni, A.: The ant system applied to the quadratic assignment problem. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering* 11 (1999) 5, S. 769-778.

MÄNNEL 1993

Männel, W.: Moderne Konzepte für Kostenrechnung, Controlling und Kostenmanagement. Controlling & Management (früher KRP) 37 (1993) 2, S. 69-78.

MAYER 1998

Mayer, R.: Kapazitätskostenrechnung. München: Vahlen 1998.

MEIER & HANENKAMP 2003

Meier, H.; Hanenkamp: Monitoringsysteme zur adaptiven Fabrikplanung. wt Werkstattstechnik 93 (2003) 4, S. 271-274.

MELLER & GAU 1996

Meller, R.; Gau, K.-Y.: The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives. Journal of Manufacturing Systems 15 (1996) 5, S. 351-366.

MELLEROWICZ 1962

Mellerowicz, K.: Allgemeine Betriebswirtschaftslehre - Band 2. 11. Aufl. Berlin: De Gruyter 1962.

MELLEROWICZ 1977

Mellerowicz, K.: Neuzeitliche Kalkulationsverfahren. 6. Aufl. Freiburg: Haufe 1977.

METROPOLIS et al. 1953

Metropolis, N.; Rosenbluth, A. W.; Rosenbluth, M. N.; Teller, A. N.; Teller, E.: Equation of state calculations by fast computing machines. Journal of Chemical Physics 21 (1953) 6, S. 1087-1092.

MILBERG 2000

Milberg, J.: Unternehmenspolitik im Wandel. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium: ... nur der Wandel bleibt; Münchener Kolloquium 2000, München 16./17.3.2000. München: Utz 2000, S. 311-331.

MOEWS 1996

Moews, D.: Kosten- und Leistungsrechnung. 6. Aufl. München: Oldenbourg 1996.

MONTREUIL 1990

Montreuil, B.: A modelling framework for integrating layout design and flow network design. In: Proceedings of the Material Handling Research Colloquium; Hebron, Kentucky. 1990, S. 43-58.

MOORE & REICHERT 1983

Moore, J.; Reichert, A.: An Analysis of Financial Management Techniques Currently Employed by Large U.S. Corporations. Journal of Business Finance and Accounting 10 (1983) 4, S. 623-645.

MÜLLER et al. 2003

Müller, A.; Uecker, P.; Zehbold, C.: Controlling für Wirtschaftsingenieure, Ingenieure und Betriebswirte. München: Hanser 2003.

MÜLLER-MERBACH 1979

Müller-Merbach, H.: Datenursprungsbezogene Planungssysteme. ZfB 49 (1979) 2, S. 151-161.

NIEDERLÄNDER 2000

Niederländer, F.: Dynamik in der internationalen Produktpolitik von Automobilherstellern. Wiesbaden: Gabler 2000.

NIEMANN & WESTKÄMPER 2004

Niemann, J.; Westkämper, E.: Investitionskosten versus Betriebskosten. wt Werkstattstechnik 94 (2004) 3, S. 43-47.

NIEß 1980

Nieß, P.: Kapazitätsabgleich bei flexiblen Fertigungssystemen. Diss. Universität Stuttgart (1980). Berlin: Springer 1980. (IPA-Forschung und Praxis 39).

NYHUIS et al. 2004

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

OTTEN 1982

Otten, R. H. J. M.: Automatic floor plan design. In: Proceedings of the 19th ACM-IEEE Design Automation Conference. 1982, S. 261-267.

PATZAK 1982

Patzak, G.: Systemtechnik - Planung komplexer innovativer Systeme. Berlin: Springer 1982.

PERLEWITZ 1999

Perlewitz, U.: Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung der Effektivität von Produktionseinrichtungen. Diss. Technische Universität Berlin (1998). Berlin: IPK 1999. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

PERRIDON & STEINER 1993

Perridon, L.; Steiner, M.: Finanzwirtschaft der Unternehmung. 7. Aufl. München: Vahlen 1993.

PETERMANN et al. 2000

Petermann, J.; Schlegel, A.; Weber, T.; Wefelscheid, J.: Simulationsunterstützung für betriebliche Entscheidungen im operativen und dispositiven Bereich. *Industrie Management* 16 (2000) 3, S. 14-18.

PFEIFER 1993

Pfeifer, T.: Qualitätsmanagement - Strategien, Methoden, Techniken. München: Hanser 1993.

PICOT et al. 1996

Picot, A.; Reichwald, R.; Wigand, R. T.: Die grenzenlose Unternehmung. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler 1996.

PIKE 1983

Pike, R. H.: A Review of Recent Trends in Formal Capital Budgeting Processes. *Accounting and Business Research* 13 (1983) 3, S. 201-208.

PINCZOLITS 2003

Pinczolits, K.: Der befreite Vertrieb: mit einer Zeltorganisation individuelle Wege zum Kunden finden. Frankfurt: Campus 2003.

PLAUT 1976

Plaut, H.-G.: Entwicklungsformen der Plankostenrechnung. *Schriften zur Unternehmensführung* 22 (1976), S. 5-24.

PLAUT 1984a

Plaut, H.-G.: Grenzplankosten- und Deckungsbeitragsrechnung als modernes Kostenrechnungssystem - Teil 1. *KRP* 28 (1984) 1, S. 20-26.

PLAUT 1984b

Plaut, H.-G.: Grenzplankosten- und Deckungsbeitragsrechnung als modernes Kostenrechnungssystem - Teil 2. *KRP* 28 (1984) 1, S. 67-72.

POUGET 2000

Pouget, P. M.: Ganzheitliches Konzept für rekonfigurierbare Produktionssysteme auf Basis autonomer Produktionsmodule. Diss. ETH Zürich (1999). Düsseldorf: VDI-Verlag 2000. (Fortschritts-Berichte VDI Reihe 2, 537).

PREINREICH 1937

Preinreich, G. A. D.: Valuation and Amortisation. The Accounting Review 12 (1937), S. 209-224.

PRESS et al. 1986

Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T.: Numerical Recipes - The Art of Scientific Computing. 1. Aufl. Cambridge: Cambridge University Press 1986.

PROBST & GOMEZ 1993

Probst, G.; Gomez, P.: Vernetztes Denken: Ganzheitliches Führen in der Praxis. 2. Aufl. Wiesbaden: Gabler 1993.

REFA 1991

REFA: Methodenlehre der Betriebsorganisation - Planung und Steuerung, Teil 3. München: Hanser 1991.

REICHMANN 1973

Reichmann, T.: Kosten und Preisgrenzen: die Bestimmung von Preisuntergrenzen und Preisobergrenzen im Industriebetrieb. Wiesbaden: Gabler 1973.

REICHMANN 1985

Reichmann, T.: Grundlagen einer systemgestützten Controlling-Konzeption mit Kennzahlen. ZfB 55 (1985) 12, S. 887-898.

REICHMANN 1997

Reichmann, T.: Controlling mit Kennzahlen und Managementberichten. 5. Aufl. München: Vahlen 1997.

REICHMANN & LACHNIT 1977

Reichmann, T.; Lachnit, L.: Kennzahlensysteme als Instrument zur Planung, Steuerung und Kontrolle von Unternehmungen. Maschinenbau (1977) 9, S. 45-53.

REICHMANN & SCHOLL 1984

Reichmann, T.; Scholl, H.-J.: Kosten- und Erfolgscontrolling auf der Basis von Umsatzplänen. DBW 44 (1984) 3, S. 427-437.

REICHMANN & OECKING 1994

Reichmann, T.; Oecking, G.: Fixkostenmanagement auf Basis controllingorientierter Vertragsdatenbanken. Controlling 6 (1994) 5, S. 252-261.

REINEKE 2004

Reineke, M.: A*-Algorithmus.

<<http://fuzzy.cs.uni-magdeburg.de/studium/graph/txt/reineke.pdf>>
(25.08.2004)

REINHART & CISEK 2003

Reinhart, G.; Cisek, R.: Mit Mobilität zur wandlungsfähigen Produktion. In: Reinhart, G. et al. (Hrsg.): Marktchance Individualisierung. Berlin: Springer 2003, S. 75-88.

REINHART et al. 1999

Reinhart, G.; Dürrschmidt, S.; Hirschberg, A.; Selke, C.: Wandel - Bedrohung oder Chance? io management 68 (1999) 5, S. 20-24.

REINHART et al. 2002

Reinhart, G.; Berlak, J.; Effert, C.; Selke, C.: Wandlungsfähige Fabrikgestaltung. ZWF 97 (2002) 1-2, S. 18-23.

RIEBEL 1983

Riebel, P.: Thesen zur Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung. In: Chmielewicz, K. (Hrsg.): Entwicklungslinien der Kosten- und Erlösrechnung. Stuttgart: Schäffer-Poeschel 1983, S. 21-47.

RIEBEL 1985

Riebel, P.: Überlegungen und Fallstudien zur Bedeutung der Entscheidungssequenz für die Unternehmensrechnung. In: Stöppler, S. (Hrsg.): Information und Produktion: Beiträge zur Unternehmenstheorie. Stuttgart: Poeschel 1985, S. 243-276.

RIEBEL 1994

Riebel, P.: Einzelkosten- und Deckungsbeitragsrechnung: Grundfragen einer markt- und entscheidungsorientierten Unternehmensrechnung. 7. Aufl. Wiesbaden: Gabler 1994.

RIESER 1980

Rieser, I.: Frühwarnsysteme für die Unternehmenspraxis. München: Florentz 1980.

ROLLBERG 2001

Rollberg, R.: Integrierte Unternehmensplanung. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2001.

ROLLBERG 2002

Rollberg, R.: Integrierte Produktionsplanung - vom theoretischen Ideal der Simultanplanung bis zum praktischen Kompromiss des "Advanced Planning and Scheduling (APS)". In: Keuper, F. (Hrsg.): Produktion und Controlling. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag 2002, S. 127-155.

ROSENBLATT 1986

Rosenblatt, M. J.: The dynamics of plant layout. Management Science 32 (1986) 1, S. 76-86.

RUPPER 1991

Rupper, P.: Unternehmenslogistik - Ein Handbuch für Einführung und Ausbau der Logistik im Unternehmen. 3. Aufl. Zürich: Industrielle Organisation 1991.

SAAD 2003

Saad, S. M.: The reconfiguration issues in manufacturing systems. Journal of Materials Processing Technology 138 (2003) 1-3, S. 277-283.

SCHILLING-PRAETZEL et al. 2002

Schilling-Praetzel, M.; Reinhart, G.; Cisek, R.: ProMotion - Steigerung der Wandlungsfähigkeit durch mobile Produktionssysteme. In: Bey, I. (Hrsg.): Karlsruher Arbeitsgespräche 2002 - Forschung für die Produktion von morgen. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH 2002, S. 336-345.

SCHOLL 1981

Scholl, H.-J.: Fixkostenorientierte Plankostenrechnung : die Grenzplankostenrechnung als Informationsinstrument zur Planung, Steuerung und Kontrolle unter besonderer Berücksichtigung der Betriebsbereitschaftskosten. Würzburg: Physica 1981.

SCHÖNEBURG et al. 1994

Schöneburg, E.; Heinzmann, F.; Feddersen, S.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien: eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution. Bonn: Addison-Wesley 1994.

SCHUH et al. 1998

Schuh, G.; Millarg, K.; Göransson, A.: Virtuelle Fabrik: Neue Marktchancen durch dynamische Netzwerke. München: Hanser 1998.

SCHUH et al. 2004

Schuh, G.; Kampker, A.; König, R.: Strukturcontrolling von Produktionssystemen - Kontinuierliche Überwachung wandlungsfähiger Produktionssysteme. *Wt Werkstatttechnik* 94 (2004) 4, S. 122-127.

SCHWEITZER & KÜPPER 1991

Schweitzer, M.; Küpper, H.-U.: Systeme der Kostenrechnung. 5. Aufl. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1991.

SCHWEITZER & FRIEDL 1994

Schweitzer, M.; Friedl, B.: Aussagefähigkeit von Kostenrechnungssystemen für das programmorientierte Kostenmanagement. In: Seicht, G. (Hrsg.): *Jahrbuch für Controlling und Rechnungswesen*. Wien: Linde 1994, S. 65-100.

SCHWEITZER & KÜPPER 1998

Schweitzer, M.; Küpper, H.-U.: Systeme der Kosten- und Erlösrechnung. 7. Aufl. München: Vahlen 1998.

SEICHT 1963

Seicht, G.: Die stufenweise Grenzkostenrechnung - Ein Beitrag zur Weiterentwicklung der Deckungsbeitragsrechnung. *ZfB* 33 (1963) 12, S. 693-709.

SEICHT 1988

Seicht, G.: Die Entwicklung der Grenzplankosten- und Deckungsbeitragsrechnung. In: Scheer, A. W. (Hrsg.): *Grenzplankostenrechnung: Stand und aktuelle Probleme*. Wiesbaden: Gabler 1988, S. 31-51.

SESTERHENN 2003

Sesterhenn, M.: Bewertungssystematik zur Gestaltung struktur- und betriebsvariabler Produktionssysteme. Diss. RWTH Aachen (2003). Aachen: Shaker 2003. (Berichte aus der Produktionstechnik 1/2003).

SHANG 1993

Shang, J. S.: Multicriteria facility layout problem: an integrated approach. *European Journal of Operational Research* 66 (1993) 3, S. 291-304.

SIEGWART 2002

Sieewart, H.: Kennzahlen für die Unternehmensführung. 6. Aufl. Bern: Haupt 2002.

SIEGWART & RAAS 1991

Sieewart, H.; Raas, F.: CIM-orientiertes Rechnungswesen: Bausteine zu einem System-Controlling. Düsseldorf: VDI-Verlag 1991.

SIMON 2001

Simon, H. A.: The sciences of the artificial. 3. Aufl. Cambridge, Massachusetts: MIT Press 2001.

SOLIMANPUR et al. 2004

Solimanpur, M.; Vrat, P.; Shankar, R.: Ant colony optimization algorithm to the intercell layout problem in cellular manufacturing. European Journal of Operational Research 157 (2004) 3, S. 592-606.

SPATH et al. 2001

Spath, D.; Baumeister, M.; Dill, C.: Ist Flexibilität genug? Zum Management von Turbulenzen sind neue Fähigkeiten gefragt. ZWF 96 (2001) 5, S. 235-241.

SPATH et al. 2002

Spath, D.; Baumeister, M.; Rasch, D.: Wandlungsfähigkeit und Planung von Fabriken - Ein Ansatz durch Fabriktypologisierung und unterstützenden Strukturbaukasten. ZWF 97 (2002) 1-2, S. 28-32.

STAEHELIN 1982

Stachelin, E.: Investitionsrechnung. 3. Aufl. Diessenhofen: Rüegger 1982.

STALK & HOUT 1990

Stalk, G.; Hout, K.: Zeitwettbewerb - Schnelligkeit entscheidet auf den Märkten der Zukunft. Frankfurt: Campus 1990.

STEINKE 2003

Steinke, L.: Spieleprogrammierung. Bonn: BHV 2003.

STEINMÜLLER 1997

Steinmüller, P.: Garant für den Erfolg ist der minimale Produktionsausfall. Industrieanzeiger 109 (1997) 47-48, S. 24-26.

STÖPPLER et al. 1992

Stöppler, S.; Fischer, R.; Rogalski, M.: Systematisierung der Kostenkategorien und -abhängigkeiten für das Kostencontrolling. Betriebswirtschaftliche Forschung und Praxis (BFuP) 44 (1992) 4, S. 359-373.

STÜTZLE 1987

Stütze, G.: Langfristige Kapazitätsplanung unter Berücksichtigung der betrieblichen Elastizität. München: Florentz 1987.

SWOBODA 1969

Swoboda, P.: Kostenrechnung und Preispolitik. 4 Aufl. Wien: Industrieverlag Linde 1969.

SYSKA 1990

Syska, A.: Kennzahlen für die Logistik. Diss. RWTH Aachen (1990). Berlin: Springer 1990. (Forschung für die Praxis 31).

TAM & LI 1991

Tam, K. Y.; Li, S. L.: A hierarchical approach to the facility layout problem. International Journal of Production Research 29 (1991) 1, S. 165-184.

TEMPELMEIER 1988

Tempelmeier, H.: Materiallogistik - Quantitative Grundlagen der Materialbedarfs- und Losgrößenplanung. Berlin: Springer 1988.

THARUMARAJAH et al. 1996

Tharumarajah, A.; Wells, A. J.; Nemes, L.: Comparison of the bionic, fractal and holonic manufacturing concepts. International Journal of Computer Integrated Manufacturing 9 (1996) 3, S. 217-226.

UEDA 1992

Ueda, K.: A Concept for Bionic Manufacturing Systems Based on DNA-type Information. In: Proceedings of the 8th International PROLAMAT Conference; Tokyo. 1992, S. 853-863.

UEDA et al. 1997

Ueda, K.; Vaario, J.; Ohkura, K. H.: Modelling of biological manufacturing systems for dynamic reconfiguration. CIRP Annals 46 (1997) 1, S. 343-346.

VDI 4400

VDI 4400, Blatt 2: Logistikkennzahlen für die Produktion. Düsseldorf: VDI-Verlag 2000

WARNECKE 1993

Warnecke, H.-J.: Revolution der Unternehmenskultur: das fraktale Unternehmen. 2. Aufl. Berlin: Springer 1993.

WÄSCHER 1994

Wäscher, G.: Layoutplanung für Produktionssysteme. In: Isermann, H. (Hrsg.): Logistik: Beschaffung - Produktion - Distribution. Landsberg/Lech: Moderne Industrie 1994.

WEBER 1996a

Weber, B.: Die Fluide Organisation: konzeptionelle Überlegungen für die Gestaltung und das Management von Unternehmen in hochdynamischen Umfeldern. Diss. Hochschule St. Gallen (1995). Bern: Haupt 1996. (St. Galler Beiträge zum integrierten Management 7).

WEBER 1996b

Weber, J.: Logistik- und Produktionscontrolling. In: Eversheim, W. et al. (Hrsg.): Produktion und Management, Teil 2. 7. Aufl. Berlin: Springer 1996.

WEHRLE-STREIF 1989

Wehrle-Streif, U.: Empirische Untersuchung zur Investitionsrechnung. Köln: Deutscher Instituts-Verlag 1989.

WESTKÄMPER 2000

Westkämper, E.: Kontinuierliche und partizipative Fabrikplanung. wt Werkstattstechnik 90 (2000) 3, S. 92-95.

WESTKÄMPER 2003

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

WESTKÄMPER et al. 1997

Westkämper, E.; v. Briel, R.; März, L.: Planung in dynamischen Produktionssystemen - Wandlungsfähigkeit als Wettbewerbsvorteil. ZWF 92 (1997) 12, S. 639-642.

WIENDAHL 1987

Wiendahl, H.-P.: Belastungsorientierte Fertigungssteuerung. München: Hanser 1987.

WIENDAHL 2002

Wiendahl, H.-P.: Wandlungsfähigkeit: Schlüsselbegriff der zukunftsfähigen Fabrik. *wt Werkstattstechnik* 92 (2002) 4, S. 122-127.

WIENDAHL & HERNÁNDEZ 2000

Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.: Wandlungsfähigkeit - neues Zielfeld der Fabrikplanung. *Industrie Management* 16 (2000) 5, S. 37-41.

WIENDAHL & HARMS 2001a

Wiendahl, H.-P.; Harms, T.: Selbstorganisierte Strukturadaptation auf Basis von Produktionsagenten. *Industriemanagement* 17 (2001) 6, S. 8-12.

WIENDAHL & HARMS 2001b

Wiendahl, H.-P.; Harms, T.: Betreibermodelle - Ein Ansatz zur Verfügbarkeitssteigerung komplexer Produktionsanlagen. *ZWF* 96 (2001) 6, S. 324-327.

WIENDAHL et al. 1996

Wiendahl, H.-P.; Menzel, W.; Möller, J.: Wandel in der Fabrikplanung. *ZWF* 91 (1996) 1-2, S. 26-29.

WIENDAHL et al. 2002

Wiendahl, H.-P.; Hernández, R.; Grienitz, V.: Planung wandlungsfähiger Fabriken - Erschließung von Potenzialen mit Hilfe des Szenario-Managements. *ZWF* 97 (2002) 1-2, S. 12-17.

WILDEMANN 1990

Wildemann, H.: Einführungsstrategien für die computerintegrierte Produktion (CIM). München: TCW 1990.

WILDEMANN 2004

Wildemann, H.: Betreibermodelle - Leitfaden zur Berechnung, Konzeption und Einführung von Betreibermodellen und Pay-on-Production-Konzepten. 3. Aufl. München: TCW 2004.

WILHELM & WARD 1987

Wilhelm, M. R.; Ward, T. L.: Solving quadratic assignment problems by simulated annealing. *IIE Transactions* 19 (1987) 1, S. 107-119.

WIRTH et al. 2000

Wirth, S.; Enderlein, H.; Hildebrand, T.: Visionen zur wandlungsfähigen Fabrik. *ZWF* 95 (2000) 10, S. 456-462.

WOLL 1996

Woll, A. (Hrsg.): Wirtschaftslexikon. 8. Aufl. München: Oldenbourg 1996.

WÜBBENHORST 1984

Wübbenhorst, K.: Konzept der Lebenszykluskosten: Grundlagen, Problemstellungen und technologische Zusammenhänge. Diss. Technische Hochschule Darmstadt (1984). Darmstadt: Verlag für Fachliteratur 1984. (Reihe Betriebswirtschaft 12).

ZÄH et al. 2003

Zäh, M. F.; Cisek, R.; Sudhoff, W.; Redelstab, P.: Mit Mobilität zu mehr Strukturvariabilität. wt Werkstattstechnik 93 (2003) 4, S. 327-331.

ZÄPFEL & GFRERER 1984

Zäpfel, G.; Gfrerer, H.: Sukzessive Produktionsplanung. Wirtschaftswissenschaftliches Studium 13 (1984) 5, S. 235-241.

11 Anhang

11.1 Mathematische Formulierung des Layoutproblems

11.1.1 Das quadratische Zuordnungsproblem

Innerbetriebliche Beziehungen zwischen Maschinen, oder allgemeiner zwischen Objekten, lassen sich mathematisch durch ein quadratisches Zuordnungsproblem beschreiben. Die Formulierung eines solchen Zuordnungsproblems für gleich große Objekteinheiten wurde erstmals von KOOPMANS & BECKMANN (1957) veröffentlicht.

Hierbei wird eine Fläche in n gleich große Teilflächen, die mögliche Standorte einer Maschine repräsentieren, zerlegt. Jedem dieser Standorte wird ein Objekt zugeordnet. Diese Zuordnung muss so geschehen, dass eine Zielfunktion $Z(x)$ minimiert bzw. maximiert wird. Die von den Autoren formulierte Zielsetzung besteht in der Minimierung der Transportkosten:

$$\min Z(x) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^n t_{ij} d_{jk} x_{ij} x_{ik} \quad \forall i \neq l, k \neq j, n = p \quad (29)$$

Restriktionen:

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad (30)$$

$$\sum_{j=1}^p x_{ij} = 1; \quad x_{ij} \in \{0, 1\} \quad (31)$$

Diese Funktion setzt sich zusammen aus:

- der kürzesten Entfernung d_{jk} von Standort j zu Standort k ,
- der Transportintensität t_{ij} (Menge pro Periode) zwischen Objekt i und l sowie
- den beiden Variablen x_{ij} und x_{ik} , die die Zuordnung der Objekteinheiten zum Standort darstellen. So wird $x_{ij}=1$, wenn die Objekteinheit i dem Standort j zugeordnet wird.

Restriktion (30) gewährleistet, dass jedem Standort eine Objekteinheit zugewiesen wird. Die Mehrfachbelegung von Standorten ist durch Restriktion (31) ausgeschlossen.

11.1.2 Graphentheoretisches Modell

Graphentheoretische Ansätze verwenden Knoten und Kanten, um unterschiedliche Objekteinheiten und ihre Nachbarschaftsbeziehungen darzustellen. Knoten symbolisieren hierbei die Maschinen, Kanten stellen die Beziehungen zwischen den Maschinen dar. Darunter fallen zum Beispiel die relative Position oder der Materialfluss.

Das Hauptproblem eines Graphen ist der Nachweis der Planarität. Unter einem planaren oder ebenen Graph wird ein Graph verstanden, der in der Ebene ohne Überschneidungen von Kanten gezeichnet werden kann (DOMSCHKE 1990, S. 16). Ein Graph heißt maximal planar, wenn keine weitere Kante mehr hinzugefügt werden kann, ohne dass die Planarität verloren geht.

Das mit dem graphentheoretischen Modell dargestellte Layout kann aufgrund seiner maximalen Planarität lediglich Nachbarschaftsbeziehungen darstellen, Beziehungen zwischen nicht benachbarten Objekteinheiten werden nicht berücksichtigt. Daraus resultiert im Gegensatz zu dem quadratischen Zuordnungsverfahren ein Informationsverlust, der die reale Abbildung des Layouts behindert.

11.1.3 Gemischt-ganzzahlige Programmierung

Die erste Anwendung im Rahmen eines Layoutproblems ist bei MONTREUIL (1990) zu finden. Der Wertebereich der zu ermittelnden Variablen wird durch die Formulierung von Restriktionen (z.B. Überschneidungsfreiheit der Maschinen, Anordnung innerhalb der Fabrikfläche etc.) eingeschränkt. Dabei müssen alle oder einige Variablen ganzzahlige Werte aufweisen.

Obwohl die Rechnersysteme immer leistungsfähiger werden, existieren bisher keine exakten Ansätze, um reale Layoutfragestellungen zu lösen. SOLIMANPUR et al. (2004, S. 593) geben eine maximale Obergrenze von 25 Objekteinheiten an, die mit diesem Modell angeordnet werden können.

11.2 Lösungsverfahren zur Layoutplanung

11.2.1 Lösungsverfahren nach LACKSONEN & ENSCORE (1993)

LACKSONEN & ENSCORE (1993) formulieren das Problem der dynamischen Layoutplanung (DFLP) als quadratische Zuordnung. Die Maschinen werden alle als gleich groß angenommen. Orientierungen (horizontal oder vertikal) sind nicht vorgesehen.

Die Zielfunktion (32) beschreibt den mathematischen Zusammenhang zur Ermittlung der Materialflusskosten. Restriktion (33) stellt dabei sicher, dass jedem Standort j nur exakt eine Maschine i in jeder Zeitperiode s zugeordnet wird. Die zweite Restriktion (34) legt fest, dass jeder Maschine in jeder Periode nur ein Standort zugewiesen wird. Die Zielfunktion lautet:

$$\min \sum_{s=1}^T \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N A_{ijklst} X_{ijs} X_{klt} \quad (32)$$

Restriktionen:

$$\sum_{i=1}^N X_{ijs} = 1; \quad i = 1, \dots, N; \quad s = 1, \dots, T \quad (33)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ijs} = 1; \quad j = 1, \dots, N; \quad s = 1, \dots, T \quad (34)$$

$$X_{ijs} = \begin{cases} 1 & \text{wenn Maschine } i \text{ am Standort } j \text{ zur Zeit } s \text{ ist} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$A_{ijklst} = \begin{cases} C_{ikt}^1 d_{jl} & \text{wenn } (i \neq k \text{ oder } j \neq l) \text{ und } s = t \\ C_{ijt}^2 & \text{wenn } i = k \text{ und } j = l \text{ und } s = t \\ C_{ikt}^3 & \text{wenn } i \neq k \text{ und } j \neq l \text{ und } s = t + 1 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

N	Anzahl Maschinen bzw. Standorte	C_{ikt}^1	Materialflusskosten zwischen Maschine i und k in der Periode t
T	Anzahl der Zeitperioden	C_{ijt}^2	Zuordnungskosten der Maschine i zum Standort j in der Periode t
d_{jl}	Abstand zwischen Standort j und l	C_{ikt}^3	Kosten für den Austausch von Maschine i mit Maschine k zwischen zwei Zeitperioden

11.2.2 Lösungsverfahren nach SOLIMANPUR et al. (2004)

SOLIMANPUR et al. (2004) formulieren zur Lösung des Layoutproblems ein quadratisches Zuordnungsverfahren auf der Basis eines ant colony optimization-Algorithmus (ACO). Im Gegensatz zu anderen hier vorgestellten Verfahren werden hier die Maschinen zu Fertigungszellen aggregiert. Das Zuordnungsproblem wird wie folgt definiert: Jedem freien Standort der gerasterten Fabrikfläche wird eine Fertigungszelle mit dem Ziel zugeordnet, die gesamten Materialflussintensitäten zwischen den Zellen zu minimieren gemäß:

$$\min \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^C \sum_{l=1}^C \sum_{k=1}^C f_{ij} d_{hl} x_{il} x_{jh} \quad (35)$$

Restriktionen:

$$\sum_{l=1}^C x_{il} = 1; \quad i = 1, 2, \dots, C \quad (36)$$

$$\sum_{i=1}^C x_{il} = 1; \quad i = 1, 2, \dots, C \quad (37)$$

$$\forall x_{il} \in \{0, 1\} \quad \forall i, l \in \{1, 2, \dots, C\}$$

$$x_{il} = \begin{cases} 1, & \text{wenn Zelle } i \text{ Standort } l \text{ zugewiesen wird, sonst} \\ 0 & \end{cases}$$

i, j	Zellenindizes
h, l	Standortindizes
C	Anzahl Fertigungszellen bzw. Standorte
f_{ij}	Transportfrequenz zwischen Zelle i und j
d_{hl}	Entfernung zwischen Standort h und l
k	Index der Ameise
η_{il}	Erwünschtheit einer Zuordnung
ν	Index der Zuordnung
V_k	Gedächtnis der Ameise k , speichert die Zuordnungen Zelle↔Standort
Tabu_k	Gedächtnis der Ameise k , speichert die bereits zugeordneten Fertigungszellen
LB	untere Grenze des Optimumwertes der Zielfunktion
\bar{z}	gleitender Durchschnitt der letzten K Lösungen
t	Index der Iteration
I	Anzahl Iterationen
z^k	aktueller Wert der Zielfunktion

α	relative Bedeutung einer Pheromonspur
p_{il}^k	Wahrscheinlichkeit, mit der Zelle i Standort l zugeordnet wird
$f_{\pi(s)i}$	Transportfrequenz zwischen Maschine π , die Standort s zugeordnet ist, und Maschine i ; Teillösung des Zuordnungsproblems

Die Restriktion (36) stellt dabei sicher, dass jeder freie Fertigungszellenstandort der Grundfläche nur einer Fertigungszelle zugeordnet wird. Restriktion (37) verhindert, dass Zellen mehrfach zugewiesen werden.

Des Weiteren müssen folgende Elemente zur vollständigen Beschreibung des Algorithmus spezifiziert werden:

- Erzeugen von Lösungen

Jede vollständige Lösung des Layoutproblems wird als Permutation der Fertigungszellen betrachtet. Zur Generierung einer Lösung beginnt eine Ameise den Zellenstandorten der Grundfläche Fertigungszellen zuzuweisen, bis eine vollständige Zuweisung erfolgt ist. Dabei merkt sich die Ameise die Nummern der bisher zugewiesenen Fertigungszellen in einer Tabuliste. So wird eine doppelte Zuordnung einer Fertigungszelle zu mehreren Standorten vermieden.

- Heuristische Informationen

Im Gegensatz zu realen Ameisen können diese virtuellen Ameisen heuristische Informationen berücksichtigen, während sie die Fertigungszellen den Standorten zuordnen. Diese Informationen beziehen sich auf die Erwünschtheit einer Zuordnung. Sie wird mit η_{il} bezeichnet und wie folgt berechnet:

$$\eta_{il} = \frac{1}{1 + \sum_{s=1}^{l-1} (f_{\pi(s)l} \cdot d_{sl} + f_{i\pi(s)} \cdot d_{ls})} \quad (38)$$

Der Nenner der Formel (38) erfasst dabei den Beitrag jeder Zuordnung zum Wert der Zielfunktion. Der Ausdruck $f_{\pi(s)i}$ beschreibt die Transportfrequenz zwischen Maschine π , die bereits dem Standort s zugeordnet ist, und der Maschine i . Diese Zuordnung stellt noch keine vollständige Lösung dar.

- Pheromon-Aktualisierungs-Regel

Äquivalent zu realen Ameisen hinterlassen ihre virtuellen Vertreter bei jeder Zuordnung eine Pheromonspur. Bei den Zuordnungen, die am häufigsten verwendet werden, ist dementsprechend die Pheromonkonzentration höher. Die Aktualisie-

nung der Pheromonkonzentration durch den Pfad der letzten Ameise kann kontinuierlich erfolgen, d.h. nach jeder Zuordnung, oder am Ende nach einer vollständigen Lösung. Bei der hier vorgeschlagenen Vorgehensweise wird die Pheromonkonzentration erst aktualisiert, wenn ein Vergleich mit den vorhergehenden Lösungen eine Verbesserung des Zielwertes ergibt. Es ist

$$\tau_{il}(t) = \tau_{il}(t-1) + \sum_k \Delta\tau_{il}^k \quad (39)$$

$$\Delta\tau_{il}^k = \tau_0 \cdot \left(1 - \frac{z^k - LB}{z - LB} \right) \quad \forall v = (i, l) \in V^k \quad (40)$$

- Auswahlwahrscheinlichkeit

Die Auswahl einer neuen Zuordnung durch eine Ameise wird von der Pheromonkonzentration und der Erwünschtheit einer Zuordnung beeinflusst. Diese Parameterkombination wird in der folgenden Wahrscheinlichkeit p_{il}^k erfasst, mit der Ameise k die Fertigungszelle i dem Standort l zuweist:

$$p_{il}^k = \frac{\alpha \cdot \tau_{il} + (1 - \alpha) \cdot \eta_{il}}{\sum_{\alpha \in \text{Tabu}_k} (\alpha \cdot \tau_{il} + (1 - \alpha) \cdot \eta_{il})}; \quad i \notin \text{Tabu}_k \quad (41)$$

Der Term im Zähler beschreibt die so genannte Fitness der jeweiligen Zuordnungen. Die Ameise wählt die Zuordnung aus, die den größten Fitnesswert aufzuweisen hat.

- Optimierungs-Mechanismus

Als großer Nachteil des ACO-Algorithmus kann angesehen werden, dass er weniger gute Lösungen des Layoutproblems erzeugt als Verbesserungsverfahren (KUSIAK & HERAGU 1987). Auf der anderen Seite kann die ausschließliche Verwendung letztgenannter Verfahren zur Erzeugung zufällig generierter Lösungen nicht zum Optimum führen (SOLIMANPUR et al. 2004, S. 600). Daher wird der ACO-Algorithmus um einen Vertauschungsalgorithmus erweitert, der so lange zwei Fertigungszellen miteinander vertauscht, bis der Zielwert stagniert, d.h. bis ein lokales (oder globales) Optimum erreicht ist.

- Abbruch-Bedingung

Empirische Untersuchungen des ACO-Algorithmus von MANIEZZO & COLORNI (1999) zeigen, dass bereits in frühen Phasen eine Stagnation eintritt und sich der Zielwert nicht weiter verbessert. Darum wird der Algorithmus beendet, sobald der Zielwert in den letzten Iterationen keine Verbesserung mehr erfährt.

11.2.3 Lösungsverfahren nach CHIANG (2001)

Bei dem Verfahren von CHIANG (2001) handelt es sich um eine Weiterentwicklung des quadratischen Zuordnungsproblems. Hierbei wird nicht mehr wie bisher die Grundfläche in gleich große Flächen geteilt, sondern die Maschinen sind frei auf der Fabrikgrundfläche beweglich.

Ausgehend von einem Initiallayout wird mit einer metaheuristischen Methode, dem *tabu search*-Algorithmus, die bestehende Lösung optimiert. CHIANG formuliert das Layoutproblem als Anordnung von Maschinen mit geometrischen Charakteristiken auf einer ebenen zusammenhängenden Fläche. Die Maschinen haben eine vorgegebene rechteckige Form sowie eine wählbare Orientierung (horizontal/vertikal) und sind beweglich oder feststehend. Die Maschinen dürfen sich weder flächenmäßig überschneiden noch die vorgegebene Fabrikgrundfläche überschreiten.

Die Kosten aufgrund des Materialaustausches sind von der rechtwinklig gemessenen Entfernungen der geometrischen Mittelpunkte der Maschinen abhängig. Ziel ist die Minimierung dieser Kosten (1) unter Berücksichtigung aller Vorgaben und Restriktionen:

$$\min \sum_{i \in F} \sum_{j \in F} f_{ij} d_{ij} \quad (42)$$

F	Anzahl Maschinen
d_{ij}	Abstand der geometrischen Mittelpunkte von Maschine i und Maschine j
f_{ij}	gewichteter Materfluss zwischen Maschine i und j

Zur Visualisierung seiner Modellvorstellung definiert CHIANG ein Koordinatensystem und überträgt die geometrischen Eigenschaften und Randbedingungen der Maschinen in eine mathematische Schreibweise. Zwei Maßnahmen, die zu einer Verbesserung der Initiallösung führen sollen, werden von CHIANG formuliert:

Beim Austauschverfahren werden die Koordinaten der linken oberen Ecke der zu tauschenden Maschinen übergeben. Dabei muss die Orientierung der Maschinen berücksichtigt werden. Weil diese Maschinen unterschiedlich groß sein können, muss anschließend die Position aller Maschinen überprüft und angepasst werden.

Das Bewegen einer Maschine ist definiert als eine Operation, die eine Maschine benachbart zu einer anderen anordnet. CHIANG vereinfacht die Anordnung, in-

dem er vier Nachbarschaftsbeziehungen vorgibt und so eine Vielzahl von Anordnungen ermöglicht: zentrierte Nachbarschaft, benachbarte Ecken, Goldener-Schnitt-Nachbarschaft und Fibonacci-Nachbarschaft (Abbildung 53). Dies führt im Wesentlichen zu einem quadratischen Zuordnungsproblem.

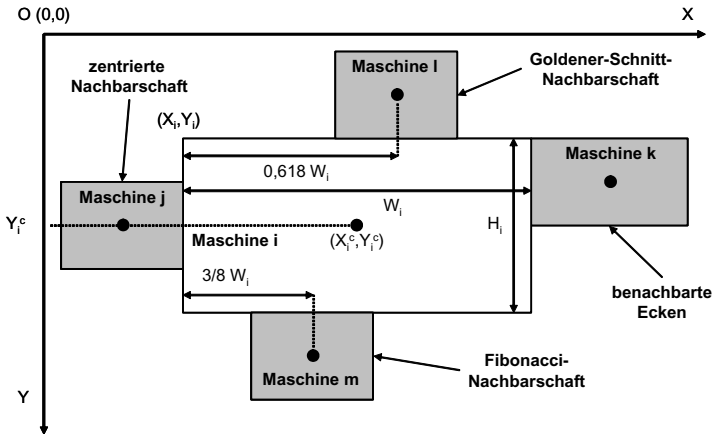


Abbildung 53: Mögliche Nachbarschaftsbeziehungen nach CHIANG (2001)

▪ **Zentrierte Nachbarschaft:**

Bei der zentrierten Nachbarschaft teilen sich zwei Maschinen eine Kante. Die Mittelpunkte dieser benachbarten Maschinen haben die gleichen x- oder y-Koordinaten (Abbildung 53, Maschine j).

▪ **Benachbarte Ecken:**

Zwei Maschinen teilen sich eine Kante und mindestens eine Ecke (Abbildung 53, Maschine k).

▪ **Goldener-Schnitt-Nachbarschaft:**

Auch hier teilen sich zwei Maschinen eine Kante. Der auf die Kante projizierte Mittelpunkt der anzuordnenden Maschine teilt die Kante der bereits angeordneten Maschine im Verhältnis 0,618 bzw. 0,382 (Abbildung 53, Maschine l).

▪ **Fibonacci-Nachbarschaft:**

Diese Art der Anordnung basiert auf der Fibonacci-Folge, die wie folgt definiert ist (43):

$$\begin{aligned} F_{v+1} &= F_v + F_{v-1}; \quad v = 1, 2, \dots \\ F_0 &= F_1 = 1 \end{aligned} \quad (43)$$

Die Fibonacci-Zahl gibt hierbei das Teilungsverhältnis der Kante der bereits angeordneten Maschine an, wo sich der projizierte Mittelpunkt der anzuordnenden Maschine befindet. CHIANG beschränkt zu Gunsten der Rechenzeit die Folge auf $v=1,2,3,4,5$. Somit ergeben sich die Teilungszahlen $\frac{1}{3}, \frac{2}{5}, \frac{3}{8}, \frac{1}{2}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{5}{8}$ und $\frac{8}{13}$ (Abbildung 53, Maschine m).

Insgesamt sind somit 68 Anordnungen einer Maschine zu einer anderen möglich. Bei der Berechnung werden jeweils die zwei möglichen Orientierungen horizontal bzw. vertikal bezogen auf die längere Kante des Rechtecks berücksichtigt. CHIANG definiert für den tabu search-Algorithmus eine zweidimensionale Tabuliste $\text{tabu}[x,y]$. Wird eine Maschine i benachbart zu Maschine j bewegt, wird in der Liste $\text{tabu}[i,j]$ gespeichert. Wird hingegen Maschine i mit Maschine j ausgetauscht, wird sowohl $\text{tabu}[i,j]$ als auch $\text{tabu}[j,i]$ vermerkt. Dies verdeutlicht die asymmetrische Eigenschaft des Bewegungsvorgangs im Vergleich zum Austauschvorgang.

Der Algorithmus beginnt bei Initiallösung des Problems. Bei jedem darauf folgenden Iterationszyklus werden die Zielwerte einer Reihe von möglichen Austausch- oder Bewegungsvorgängen berechnet. Zu Beginn des Algorithmus ist das Austauschverfahren untersagt, um die Bildung von Gruppen zu beschleunigen. Im weiteren Verlauf wird das geeignete Verfahren situationsbedingt ausgewählt. Zusätzlich wird für jede Maschine eine Liste geführt, die die aktuellen Beziehungen zu anderen Maschinen aufzeichnet. Anschließend wird die Vertauschung oder Bewegung vorgenommen, die nicht verboten ist (d.h. die noch nicht in der Tabuliste steht) und die beste Zielwertverbesserung aufweist. Der Algorithmus wird so lange fortgesetzt, bis sich keine Verbesserung mehr feststellen lässt oder der Planer abbricht.

11.2.4 Lösungsverfahren nach LACKSONEN (1997)

Dieses Verfahren kombiniert ein quadratisches Zuordnungsproblem mit einem gemischt-ganzzahligen Programm, welches mit einem *branch&bound-Algorithmus* gelöst wird (LACKSONEN 1997). Da ein gemischt-ganzzahliges Programm nur für eine kleine Anzahl an Objekten gelöst werden kann, wird ein

zweistufiges Verfahren vorgeschlagen, welches im Vorfeld einige der binären Variablen festlegt und somit das Problem verkleinert und lösbar macht.

In der ersten Stufe wird das Layoutproblem als ein quadratisches Zuordnungsproblem modelliert und mit einem *cutting planes-Algorithmus* gelöst. Das Layout dient als Grundlage für das weitere Vorgehen in Stufe zwei (vgl. Abschnitt 11.2.1).

Stufe zwei modelliert das Layoutproblem in Anlehnung an MONTREUIL (1990) mit einem gemischt-ganzzahligen Programm:

$$\min Z = \sum_{ij} F_{ij} (X_{ij}^+ + X_{ij}^- + Y_{ij}^+ + Y_{ij}^-) \quad \forall \text{ Maschinen } i \quad (44)$$

Restriktionen:

$$YU_i - YL_i + R^{0.5}X_{1i} + R^{0.5}X_{2i} = (A_i R)^{0.5} \quad \forall \text{ Maschinen } i \quad (45)$$

$$XU_i - XL_i - X_{1i} - X_{2i} = \left(\frac{A_i}{R}\right)^{0.5} \quad \forall \text{ Maschinen } i \quad (46)$$

$$Y_{1i} \leq A_i^{0.5} (1 - R^{0.5}) \quad \forall \text{ Maschinen } i \quad (47)$$

$$X_{2i} \leq A_i^{0.5} (R^{0.5} - 1) \quad \forall \text{ Maschinen } i \quad (48)$$

$$XU_i \leq XUB \quad \forall \text{ Maschinen } i \quad (49)$$

$$YU_i \leq YUB \quad \forall \text{ Maschinen } i \quad (50)$$

$$XU_i + XL_i - XU_j - XL_j - 2X_{ij}^+ + 2X_{ij}^- = 0 \quad \forall i, j \in F_{ij} > 0 \quad (51)$$

$$YU_i + YL_i - YU_j - YL_j - 2Y_{ij}^+ + 2Y_{ij}^- = 0 \quad \forall i, j \in F_{ij} > 0 \quad (52)$$

$$XL_k - XL_i \geq 0 \quad \forall i, k \in i, k \text{ stationär und } A_i \geq A_k \quad (53)$$

$$XU_i - XU_k \geq 0 \quad \forall i, k \in i, k \text{ stationär und } A_i \geq A_k \quad (54)$$

$$YL_k - YL_i \geq 0 \quad \forall i, k \in i, k \text{ stationär und } A_i \geq A_k \quad (55)$$

$$YU_i - YU_k \geq 0 \quad \forall i, k \in i, k \text{ stationär und } A_i \geq A_k \quad (56)$$

$$XL_i - XU_j + MS_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in \text{Maschine } j \text{ unterhalb/links von } i \quad (57)$$

$$YL_i - YU_j - MS_{ij} \geq -M \quad \forall i, j \in \text{Maschine } j \text{ unterhalb/links von } i \quad (58)$$

$$XL_j - XU_i + MS_{ij} \geq 0 \quad \forall i, j \in \text{Maschine } j \text{ unterhalb/rechts von } i \quad (59)$$

$$YL_i - YU_j - MS_{ij} \geq -M \quad \forall i, j \in \text{Maschine } j \text{ unterhalb/rechts von } i \quad (60)$$

$$XL_j - XU_i \geq 0 \quad \forall i, j \in \text{Maschine } j \text{ rechts von } i \quad (61)$$

$$YL_j - YU_i \geq 0 \quad \forall i, j \in \text{Maschine } j \text{ unterhalb von } i \quad (62)$$

$$S_{ij} \in \{0, 1\}$$

(XL_i, YL_i)	Eckkoordinaten von Maschine i
(XU_i, YU_i)	
XUB, YUB	maximale Gebäudekoordinaten
X_{ij}^+, X_{ij}^-	positive und negative Komponente des Abstands zwischen Maschine i und j
F_{ij}	Materialfluss zwischen Maschine i und j
S_{ij}^X, S_{ij}^Y	Wahrscheinlichkeit, mit der sich zwei Maschinen in Abhängigkeit von der Maschinenfläche überschneiden
L	Anzahl der „großen“ Maschinen im Maschinenpaar ij
L_i, L_j	Materialfluss nach links von Maschine i bzw. j
M	große Zahl, hier: $M=XUB+YUB$
A_i	Fläche der Maschine i
S_{ij}	=1, wenn Maschine j links von Maschine i =0, wenn Maschine j unterhalb von Maschine i
R	maximales Seitenverhältnis der Maschine
D_{ij}^X	Wahrscheinlichkeit, mit der sich zwei Maschinen in Abhängigkeit von der Entfernung überschneiden
P_{ij}	Tendenz zum Überschneiden wenn Maschine i rechts von Maschine j
R_i, R_j	Materialfluss nach rechts von Maschine i bzw. j
I_{ij}	approximierte Wahrscheinlichkeit, mit der sich zwei Maschinen überschneiden

Dieses Modell lokalisiert jede Maschine durch die Koordinaten ihrer linken oberen (XL_i, YL_i) und rechten unteren Ecke (XU_i, YU_i) . Jede Maschine wird als ein Rechteck unterschiedlicher Größe der Fläche A_i angesehen. Die Maschinen können horizontal oder vertikal angeordnet werden. Der Materialfluss wird rechtwinklig zwischen den geometrischen Mittelpunkten der Maschinen gemessen.

Ziel ist es, die Maschinen so anzuordnen, dass die Materialflusskosten minimiert werden (44). Restriktionen (45) bis (48) beschreiben den linearisierten Flächenbedarf der Maschinen. Restriktion (49) und (50) stellen sicher, dass die Maschinen innerhalb der Fabrikgrundfläche angeordnet werden. Bedingung (51) und

(52) formulieren den absoluten Wert der Entfernung zwischen Maschine i und j . Nicht bewegliche Maschinen aus dem quadratischen Zuordnungsproblem werden in Restriktion (53) bis (56) berücksichtigt. Diese vier Restriktionen werden bei einem statischen Layoutproblem nicht benötigt. Eines der drei Paare der Bedingungen (57) bis (60) wird benötigt, damit keine Maschine sich mit einer anderen überschneidet.

Im Folgenden wird eine Vorverarbeitung vorgeschlagen, die einige der binären Variablen festlegt und damit die Gesamtkomplexität des Problems reduziert. In dreizehn Versuchen wurden folgende drei Schlüsselfaktoren ermittelt, die einen großen Einfluss auf die Anordnung eines Maschinenpaars haben. Da die Koeffizienten auf den Ergebnissen der Versuche basieren, ist eine Übertragbarkeit auf neue Problemstellungen kritisch zu überprüfen.

- Abgeschätzte Maschinenstandorte

Für das im Rahmen des quadratischen Zuordnungsproblems erzeugte Layout wird die Anordnung der Maschinen auf der Grundlage der Rasterung abgeschätzt, ohne aber die realen Maschinenflächen zu berücksichtigen. Im gemischt-ganzzahligen Modell werden diese jedoch einbezogen. Der Vergleich beider Layouts ergibt aber nur marginale Unterschiede. Dies führt zu dem Schluss, dass es umso wahrscheinlicher ist, dass ein Maschinenpaar, welches in Stufe eins weit entfernt angeordnet wurde, auch in Stufe zwei ähnlich angeordnet wird. Die Wahrscheinlichkeit D_{ij} , mit der sich die Flächen eines Maschinenpaares ij in x -Richtung in Abhängigkeit von der Entfernung überschneiden, berechnet sich dann wie folgt (analog in y -Richtung):

$$D_{ij}^x = 1,98 - 0,25|d_{ij}^x| - 0,13|d_{ij}^x|^2; \quad d_{ij}^x = 0,1,2,3 \quad (63)$$

$$D_{ij}^x = 0; \quad d_{ij}^x > 3$$

- Maschinenflächen

Ein weiterer entscheidender Faktor ist die Größe der von der Maschine eingenommenen Fläche. Je größer die Fläche, desto größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich zwei Maschinenflächen überschneiden. Darum werden alle Maschinen ihrer Größe nach in groß (größer oder gleich dem Durchschnitt) oder klein (kleiner als der Durchschnitt) klassifiziert. Damit ergibt sich folgender Effekt der Fläche der Maschinen i und j auf die weiter entfernte Anordnung:

$$S_{ij}^X = S_{ij}^Y = 0,53 + 0,09L ; L = 0,1,2 \quad (64)$$

▪ Materialflüsse zu anderen Maschinen

Als letzter wichtiger Faktor hat sich der Materialfluss zwischen den Maschinen erwiesen. In Stufe eins ist jede Maschine an einen Materialfluss nach oben, unten, rechts und links angebunden. Auf Grund der Zielfunktion hat jede Maschine die Tendenz in die Richtung des größten Materialflusses ‚gezogen‘ zu werden. Diese Tendenzen werden in einem Wahrscheinlichkeitswert aggregiert:

$$P_{ij} = \frac{\sum_k (F_{ik} + F_{jk}) - |L_i + L_j - R_i - R_j|}{\sum_k (F_{ik} + F_{jk})} \quad (65)$$

\sum_k Summe der Materialflüsse aller Maschinen k zu Maschine i und j

Nach Skalierung und Regression ergibt sich die Auswirkung des Materialflusses auf die entfernte Anordnung eines Maschinenpaares in x-Richtung:

$$F_{ij}^X = 0,47 + 0,13P_{ij} - 0,11P_{ij}^2 + 0,225P_{ij}^3 \quad (66)$$

Eine analoge Formel kann für die y-Richtung verwendet werden.

Die drei Faktoren ((63), (64), (66)) werden zu zwei Faktoren zusammengefasst. Diese drücken die Wahrscheinlichkeit aus, mit der ein Maschinenpaar in x- bzw. y-Richtung voneinander getrennt angeordnet wird.

$$I_{ij}^X = D_{ij}^X S_{ij}^X F_{ij}^X \quad (67)$$

$$I_{ij}^Y = D_{ij}^Y S_{ij}^Y F_{ij}^Y \quad (68)$$

Der beste Wahrscheinlichkeitswert für ein Maschinenpaar, d.h. derjenige mit der geringsten Wahrscheinlichkeit für eine Überschneidung, ist definiert als:

$$I_{ij} = \min(I_{ij}^X, I_{ij}^Y) \quad (69)$$

Auf der Basis dieses Wertes werden 80 % der ganzzahligen Variablen ersetzt, d.h. die Werte, die zu den kleinsten 80 % der I_{ij} -Werte gehören. Die restlichen 20 % der Variablen werden im gemischt-ganzzahligen Programm mit einem branch&bound-Algorithmus exakt gelöst. LACKSONEN verwendet als Variable für die Verzweigung den kleinsten Wahrscheinlichkeitswert I_{ij} .

11.2.5 Lösungsverfahren nach KIM & KIM (2000)

Das von KIM & KIM (2000) entwickelte Verfahren basiert auf einem zweiphasigen heuristischen Algorithmus. Das Problem wird mit Hilfe eines gemischt-ganzzahligen Programms auf der Grundlage der Formulierung von MONTREUIL (1990) modelliert. Es ergibt sich folgende Zielfunktion:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} (x_{ij}^+ + x_{ij}^- + y_{ij}^+ + y_{ij}^-) \quad (70)$$

Restriktionen:

$$x_i^0 - x_i^1 = x_{ij}^+ - x_{ij}^- \quad \forall i, j \quad (71)$$

$$y_i^0 - y_i^1 = x_{ij}^+ - x_{ij}^- \quad \forall i, j \quad (72)$$

$$u_i^1 + u_i^2 + u_i^3 + u_i^4 = 1; \quad u_i^1, u_i^2, u_i^3, u_i^4 \in \{0, 1\} \quad \forall i \quad (73)$$

$$x_i^2 = x_i^1 + (u_i^1 + u_i^2)w_i + (u_i^3 + u_i^4)l_i \quad \forall i \quad (74)$$

$$y_i^2 = y_i^1 + (u_i^1 + u_i^3)l_i + (u_i^2 + u_i^4)w_i \quad \forall i \quad (75)$$

$$r_{ij} + r_{ji} + s_{ij} + s_{ji} \geq 1; \quad r_{ij}, s_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall i < j \quad (76)$$

$$x_i^2 \leq x_i^1 + W(1 - r_{ij}) \quad \forall i, j \quad (77)$$

$$y_i^2 \leq y_i^1 + L(1 - s_{ij}) \quad \forall i, j \quad (78)$$

$$x_i^1 = x_i^1 + I_i^x u_i^2 + I_i^y u_i^2 + (w_i - I_i^x)u_i^3 + (l_i - I_i^y)u_i^4 \quad \forall i \quad (79)$$

$$x_i^0 = x_i^1 + O_i^x u_i^2 + O_i^y u_i^2 + (w_i - O_i^x)u_i^3 + (l_i - O_i^y)u_i^4 \quad \forall i \quad (80)$$

$$y_i^1 = y_i^1 + I_i^x u_i^2 + I_i^y u_i^2 + (w_i - I_i^y)u_i^3 + (l_i - I_i^x)u_i^4 \quad \forall i \quad (81)$$

$$y_i^0 = y_i^1 + O_i^y u_i^2 + O_i^x u_i^2 + (w_i - O_i^y)u_i^3 + (l_i - O_i^x)u_i^4 \quad \forall i \quad (82)$$

$$x_i^2 \leq W \quad \forall i \quad (83)$$

$$y_i^2 \leq L \quad \forall i \quad (84)$$

$$x_i^1, y_i^1, x_i^0, y_i^0, x_i^2, y_i^2 \geq 0 \quad \forall i, j \quad (85)$$

$$x_{ij}^+, x_{ij}^-, y_{ij}^+, y_{ij}^- \geq 0 \quad \forall i, j \quad (86)$$

N Anzahl der Maschinen

W Länge der längeren Seite der rechteckigen Fabrikgrundfläche

L	Länge der kürzeren Seite der rechteckigen Fabrikgrundfläche
f_{ij}	Materialflussintensität zwischen Materialausgang Maschine i zu Materialeingang Maschine j
w_i	Länge der längeren Seite der Maschine i
l_i	Länge der kürzeren Seite der Maschine i
I_i^x, I_i^y	Abstand des Materialeingangs der Maschine i von der unteren linken Ecke in x - bzw. y -Richtung
O_i^x, O_i^y	Abstand des Materialausgangs der Maschine i von der unteren linken Ecke in x - bzw. y -Richtung
(x_i^1, y_i^1)	x - y -Koordinaten des Materialeingangs von Maschine i
(x_i^0, y_i^0)	x - y -Koordinaten des Materialausgangs von Maschine i
x_{ij}^+	$= \max(0, x_i^0 - x_j^1)$
x_{ij}^-	$= \max(0, x_i^1 - x_j^0)$
y_{ij}^+	$= \max(0, y_i^0 - y_j^1)$
y_{ij}^-	$= \max(0, y_i^1 - y_j^0)$
x_i^1, x_i^2	x -Koordinate der linken und rechten Begrenzung von Maschine i
y_i^1, y_i^2	y -Koordinate der unteren und oberen Begrenzung von Maschine i
r_{ij}	$= 1$, wenn sich Maschine i links von Maschine j befindet, sonst 0
s_{ij}	$= 1$, wenn sich Maschine i unterhalb von Maschine j befindet, sonst 0
u_i^1	$= 1$, wenn sich Maschine i in der Basisorientierung befindet, sonst 0
u_i^2	$= 1$, wenn Maschine i um 90° im Uhrzeigersinn zur Basisorientierung gedreht wurde, sonst 0
u_i^3	$= 1$, wenn Maschine i um 180° im Uhrzeigersinn zur Basisorientierung gedreht wurde, sonst 0
u_i^4	$= 1$, wenn Maschine i um 270° im Uhrzeigersinn zur Basisorientierung gedreht wurde, sonst 0
$\tilde{r}_{ij}, \tilde{s}_{ij}$	aktuelle relative Position
$\hat{r}_{ij}, \hat{s}_{ij}$	relative Position nach Austausch

Die Maschinen werden innerhalb einer ebenfalls vorgegebenen Fabrikgrundfläche ((77) und (78)) so angeordnet, dass die rechtwinklig gemessenen Entfernungen zwischen den Maschinen ((71), (72), (86)), gewichtet mit der Transportintensität, minimiert sind (70). Dabei dürfen sich die Maschinen nicht überschneiden ((76) bis (78)). Alle Maschinen haben unterschiedliche rechteckige Abmessungen ((74) und (75)) sowie gegebene Materialein- und -ausgänge ((79) bis (82)). Die Orientierung der Maschinen kann in 90° -Schritten verändert werden (73). In

der Basisorientierung befindet sich der Materialeingang in der linken Hälfte und die längere Seite der Maschine ist entlang der x-Achse ausgerichtet.

Der zur Lösung dieses Problems vorgestellte heuristische Algorithmus setzt sich aus zwei Phasen zusammen. Die erste Phase (Konstruktionsphase) dient zum Erzeugen eines Initiallayouts. Hierbei wird mit Hilfe eines wahrscheinlichkeitsgesteuerten Auswahlalgorithmus eine Reihenfolge für die Maschinenzuordnung erzeugt. Die Auswahlwahrscheinlichkeit ist umso höher, je größer die Materialflussintensität zu anderen Maschinen ist. Somit haben diese Maschinen auch eine größere Auswirkung auf den zu optimierenden Zielwert. Anschließend werden die Maschinen ihrer Reihenfolge entsprechend mit einem gemischt-ganzzahligen Modell angeordnet. Um die Lösungsqualität zu verbessern, werden mehrere Initiallayouts generiert und das beste davon für das weitere Vorgehen ausgewählt. Dies wird durch mehrere Durchläufe des Auswahl- und Anordnungsverfahrens realisiert.

In der zweiten Phase (Verbesserungsphase) werden vier Verfahren eingesetzt, die das Layout verbessern:

- Beim Positionsaustausch werden die relativen Positionen zweier Maschinen ausgetauscht (87). Anschließend erfolgt eine Neubestimmung der exakten Positionen sowie der Orientierungen aller Maschinen ((88) und (89)). Bei der Neubewertung nach der Vertauschung wird mit der Einschränkung vorgegangen, dass der Materialfluss von den Mittelpunkten der Maschinen ausgeht. Materialein- und -ausgänge werden hier zu Gunsten der Rechenzeit nicht berücksichtigt. Der Positionsaustausch wird so lange durchgeführt, bis keine Verbesserung mehr festzustellen ist. Das Problem ist wie folgt definiert:

$$\begin{aligned} \hat{r}_{kl} &= \tilde{r}_{lk}, \hat{r}_{lk} = \tilde{r}_{kl}, \hat{s}_{kl} = \tilde{s}_{lk}, \hat{s}_{lk} = \tilde{s}_{kl} \\ \hat{r}_{ki} &= \tilde{r}_{il}, \hat{r}_{ik} = \tilde{r}_{li}, \hat{s}_{ki} = \tilde{s}_{li}, \hat{s}_{ik} = \tilde{s}_{li} \text{ für } i \neq k, l \\ \hat{r}_{li} &= \tilde{r}_{ik}, \hat{r}_{il} = \tilde{r}_{kl}, \hat{s}_{li} = \tilde{s}_{ki}, \hat{s}_{il} = \tilde{s}_{kl} \text{ für } i \neq k, l \text{ und} \\ \hat{r}_{ij} &= \tilde{r}_{ij}, \hat{r}_{ji} = \tilde{r}_{ji}, \hat{s}_{ij} = \tilde{s}_{ij}, \hat{s}_{ji} = \tilde{s}_{ji} \text{ für } i \neq k, l \text{ und } j \neq k, l \end{aligned} \quad (87)$$

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} (x_{ij}^+ + x_{ij}^- + y_{ij}^+ + y_{ij}^-) \quad (88)$$

$$r_{ij} = \hat{r}_{ij}, s_{ij} = \hat{s}_{ij} \quad \forall i, j \quad (89)$$

Restriktionen: (71) – (75), (77) – (87)

- Bei der Bereichsoptimierung werden die kleinsten rechteckigen Bereiche gesucht, die drei oder vier Maschinen zusammenfassen. Innerhalb dieses Bereichs wird nun die Position und Orientierung der Maschinen optimiert ((90) - (92)), bis keine Optimierung mehr erreicht werden kann. Die entsprechenden Formulierungen lauten:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} (x_{ij}^+ + x_{ij}^- + y_{ij}^+ + y_{ij}^-) \quad (90)$$

$$r_{ij} = \tilde{r}_{ij}, \quad s_{ij} = \tilde{s}_{ij} \quad \forall i, j \neq \Phi_R \quad (91)$$

$$r_{ij} = r_{Rj}, \quad r_{ji} = r_{jR}, \quad s_{ij} = s_{Rj}, \quad s_{ji} = s_{jR} \quad \forall i \in \Phi, j \in \Phi_R \quad (92)$$

Restriktionen: (71) – (86)

- Das dritte Optimierungsverfahren ist die Orientierungs- und Positionsanpassung einer Maschine, wobei die relative Position und Orientierung der anderen Maschinen unverändert bleibt ((93) – (95)). Es gilt:

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} (x_{ij}^+ + x_{ij}^- + y_{ij}^+ + y_{ij}^-) \quad (93)$$

$$u_i^1 = \tilde{u}_i^1, \quad u_i^2 = \tilde{u}_i^2, \quad u_i^3 = \tilde{u}_i^3, \quad u_i^4 = \tilde{u}_i^4 \quad (94)$$

$$r_{ij} = \tilde{r}_{ij}, \quad s_{ij} = \tilde{s}_{ij} \quad \forall i, j \neq k \quad (95)$$

Restriktionen: (71) – (86)

- Das letzte Verfahren passt die Orientierung aller Maschinen an, wobei die relativen Positionen nicht geändert werden ((96) – (97)).

$$\min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} (x_{ij}^+ + x_{ij}^- + y_{ij}^+ + y_{ij}^-) \quad (96)$$

$$r_{ij} = \tilde{r}_{ij}, \quad s_{ij} = \tilde{s}_{ij} \quad \forall i, j \quad (97)$$

Restriktionen (71) – (75) und (77) – (86)

11.2.6 Lösungsverfahren nach DUNKER et al. (2003)

Dieses Verfahren verwendet zur Lösung des gemischt-ganzzahligen Programms genetische Algorithmen (DUNKER et al. 2003). Maschinen bzw. Maschinengruppen werden auch hier als Rechtecke betrachtet, deren Größe vorher bekannt und festgelegt ist. Die Seiten der Rechtecke sind parallel zu einem Koordinatensys-

tem in der Fabrikfläche angeordnet. Unter Berücksichtigung der inneren Struktur werden acht mögliche Orientierungen der Rechtecke definiert. Neben vier Orientierungen durch Drehen (jeweils um 90°) sind auch zwei Spiegelungen (an x- und y-Achse) möglich. DUNKER et al. verwenden folgende Notation:

$I = \{1, \dots, n\}$	Summe aller Rechtecke
$i, j \in I$	Indizes der Rechtecke
(x_a^*, y_a^*)	relative Koordinaten des Materialein-/ausgangs des i-ten Rechtecks in Bezug zu dessen Mittelpunkt
(X_a^*, Y_a^*)	absolute Koordinaten des Materialein-/ausgangs α
$\alpha, \beta \in I^*$	Indizes der Materialein-/ausgänge
$I^* = \{1, \dots, n^*\}$	Summe der Indizes der Materialein-/ausgänge
x_i^j, y_i^j	relative Koordinaten des Rechtecks A_i bezüglich A_j
$o_i^j \in \{0, 1\}$	relative Orientierung des Rechtecks A_i bezüglich A_j
$S_{ij}^D \in \{0, 1\}$	Richtung der Trennlinie (vertikal/horizontal)
$S_{ij}^O \in \{0, 1\}$	Reihenfolge der Rechtecke A_i und A_j
$(w_{\alpha\beta})_{\substack{\alpha, \beta \in I^* \\ \alpha > \beta}}$	Gewichtung des Abstands zweier Maschinen
$(w_i)_{i \in I^m}$	Gewichtung für das Bewegen eines Rechtecks (z.B. Rekonfigurationskosten)
$\delta X_{\alpha\beta}^*, \delta Y_{\alpha\beta}^*$	horizontaler und vertikaler Abstand zwischen Materialein-/ausgang α und β
$X_i^{(0)}, Y_i^{(0)}, O_i^{(0)}$	Position und Orientierung eines Rechtecks im Initiallayout
$M_i \in \{0, 1\}$	=1, wenn Änderung des Initiallayouts

Zur Darstellung verschachtelter Rechtecke (z.B. Maschinen innerhalb einer Maschinengruppe) wird ein mathematisches Modell beschrieben. Hierzu sei i^* der Index für die vollständige Fabrikfläche und i der Index für ein Rechteck. Es wird eine Funktion $P(i)$ definiert. Diese gibt die Nummer eines Rechtecks an, das zum Rechteck A_i gehören soll. Zum Beispiel bedeutet $P(6)=1$, dass Rechteck 6 ‚Unterfläche‘ von Rechteck 1 ist. Auf diese Art entsteht eine hierarchische Struktur. Darüber hinaus wird in dem Modell berücksichtigt, ob die Maschine bzw. Maschinengruppe beweglich oder feststehend ist.

In einer weiteren Restriktion wird formuliert, dass sich keine Rechtecke überschneiden. Dies ist nicht der Fall, wenn zwei Rechtecke A_i und A_j von einer ver-

tikalen oder horizontalen Linie getrennt werden können. Die Linie wird durch die Variablen S_{ij}^D und S_{ij}^O definiert.

Ziel ist es nun, die Abstände zwischen unterschiedlichen Punkten zu minimieren (98). Bei diesen Punkten handelt es sich um Materialein- und -ausgänge der Betriebsbereiche oder von Maschinen. Dabei werden die Abstände mit einem Faktor gewichtet, der entstehende Kosten (z.B. Materialhandhabungskosten) mit einbeziehen soll. Des Weiteren werden ebenfalls die Kosten für Layoutänderungen berücksichtigt. Damit ergibt sich folgende Zielfunktion:

$$\min \left(\sum_{\substack{\alpha, \beta \in I^* \\ \alpha > \beta}} w_{\alpha\beta} (\delta X_{\alpha\beta}^* + \delta Y_{\alpha\beta}^*) + \sum_{i \in I^m} w_i M_i \right) \quad (98)$$

Diese Zielfunktion wird unter Berücksichtigung von 49 Restriktionen in einen genetischen Code übertragen und mit einem genetischen Algorithmus gelöst. DUNKER et al. kodieren das ganzzahlige Problem wie folgt: Die Rechtecke einer Maschinengruppe werden zu einer Gruppe zusammengefasst. Gekennzeichnet durch $\iota=1, \dots, N_k^p$ ist ein Individuum innerhalb einer Population mit N_k^p Individuen der Generation $\gamma=1, 2, \dots$. Die Variable $b_{ij} \in \{0, 1\}$ übernimmt die Werte der binären Variable S_{ij}^D . Die beiden Vektoren $(i_1^x, \dots, i_{N_k^g}^x)$ und $(i_1^y, \dots, i_{N_k^g}^y)$ sind Permutationen des Lösungsraumes und repräsentieren die Reihenfolge der x- bzw. y-Koordinaten der Mittelpunkte der Rechtecke in der Gruppe. Das ι -te Individuum der k-ten Gruppe in der Generation γ ist dann gekennzeichnet durch:

$$I_{kt}^{(\gamma)} = \left(\left(i_1^x, \dots, i_{N_k^g}^x \right), \left(i_1^y, \dots, i_{N_k^g}^y \right), \left\{ b_{ij} \right\}_{\substack{i, j \in I_k^g \\ i > j}} \right) \quad (99)$$

Die Erzeugung einer neuen Generation, d.h. einer verbesserten Lösung, erfolgt mit den genetischen Operatoren Selektion, Kreuzung und Mutation:

- Selektion

Bei der Selektion werden nur die Lösungen für weitere Operationen ausgewählt, die einen besseren Zielwert im Vergleich zu denen der Elterngeneration haben.

- Kreuzung

Aus zwei durch Selektion ausgewählten Elterngenen werden durch Kreuzung zwei neue Gene erzeugt. Hierzu werden zufällig zwei Schnittpositionen c_1 und c_2 bestimmt. Anschließend werden bei den beiden neuen Genen von der Schnittpo-

sition c_1 bis zur Schnittposition c_2 die alten Gensequenzen der Eltern übernommen. Der Rest des Genes wird mit den Sequenzen des jeweils anderen Elterngenes ausgefüllt.

- Mutation

Bei der Mutation wird ein einzelnes Elterngen zufällig selektiert. Anschließend werden zwei ebenfalls zufällig ausgewählte Sequenzen innerhalb des Genes $(i_1^x, \dots, i_{N_g}^x)$ bzw. unabhängig davon auch in $(i_1^y, \dots, i_{N_g}^y)$ ausgetauscht.

Der eigentliche Algorithmus beginnt mit der Bildung von Maschinengruppen. Ziel dabei ist es, die Maschinengruppen so auszuwählen, dass die Materialflüsse bzw. die Materialflusskosten zwischen den Gruppen minimiert werden. DUNKER et al. verwenden einen heuristischen Gruppenbildungsalgorithmus, wie er bei HARHALAKIS et al. 1990(1990) oder TAM & LI (1991) beschrieben wird.

Zunächst wird mit einem ersten genetischen Algorithmus ein Initiallayout erzeugt. Um jede Gruppe wird anschließend ein Rechteck konstruiert, wobei jede Seitenlänge um den Faktor $1+z_k$ vergrößert wird, um mehr Platz für spätere Layoutänderungen zu bieten.

Diese Rechtecke, d.h. Maschinengruppen, werden in einem zweiten genetischen Algorithmus optimal zueinander angeordnet. Im ersten Durchlauf werden dazu die Materialein- und -ausgänge zur Vereinfachung in den geometrischen Mittelpunkt der Gruppenfläche verlegt. In den weiteren Durchgängen werden die wahren Positionen der Materialein- und -ausgänge berücksichtigt.

Verschachtelt in diesen Algorithmus optimiert ein weiterer genetischer Algorithmus die Anordnung der Maschinen innerhalb jeder Gruppe. Dabei ist diese Optimierung auf die zur Verfügung stehende Gruppenfläche beschränkt und alle externen Materialein- und -ausgänge sind in dieser Phase fixiert. Ist die Optimierung der Maschinen abgeschlossen, d.h. trat bei den letzten Generationen keine nennenswerte Zielwertverbesserung auf, wird ein neues Rechteck um jede Gruppe konstruiert. Haben sich dabei die Seitenverhältnisse stark verändert, wird der Vergrößerungsfaktor z_k vergrößert, ansonsten verkleinert. Anschließend werden die Seiten jedes Rechtecks wieder um den Faktor $1+z_k$ vergrößert. Der gesamte Algorithmus wird durchgeführt, so lange sich der z_k -Wert jeder Gruppe nicht mehr verkleinert.

11.2.7 Lösungsverfahren nach GARCÉS-PÉREZ et al. (1996)

Im Verfahren von GARCÉS-PÉREZ et al. (1996) wird das Layout einer Fabrik nicht mathematisch mit Hilfe eines quadratischen Zuordnungsproblems oder einer gemischt-ganzzahligen Programmierung beschrieben, sondern mit der *slicing tree structure* (STS), einer Graphendarstellung, die auf OTTEN (1982) zurückzuführen ist. Die anzuordnenden Maschinen werden als Rechtecke approximiert und in einer kontinuierlichen Fabrikfläche angeordnet. Eine horizontale oder vertikale Position der Maschinen ist möglich, wird im Weiteren aber nicht berücksichtigt. Die Seitenverhältnisse r_i eines Rechtecks sind definiert als der Quotient aus Breite und Höhe der Maschine. Die Maschinen können überall auf der Fläche positioniert werden, ohne sich jedoch zu überschneiden.

Um von der STS-Darstellung zu einem realen Layout zu gelangen, schlagen GARCÉS-PÉREZ et al. ein *top-down-bottom-up-Verfahren* vor. Das Verfahren gliedert sich in vier Schritte:

1. Zu Beginn wird eine quadratische Fläche, die so groß wie die benötigte Fläche aller Maschinen ist, nach dem *top-down*-Verfahren zu einem Initiallayout eingeteilt. Die erhaltenen Flächen entsprechen zwar dem Flächenbedarf, stimmen aber nicht in den Seitenverhältnissen.
2. Nun wird jede Seite des Quadrats um einen Faktor $k \text{ scale}W$ bzw. $k \text{ scale}H$ in der Breite bzw. Höhe größer skaliert. Die Faktoren werden so gewählt, dass die Grundfläche groß genug ist, um die Maschinen ohne Überschneidung in der vorgesehenen Position anzuordnen.
3. Jede Maschinenfläche wird den wahren Bedürfnissen der Maschine in Seitenverhältnis, Länge und Breite durch Expansion bzw. Zusammenziehen angepasst. Dabei bleiben die geometrischen Mittelpunkte fixiert. Alle Maschinen liegen anschließend im richtigen Seitenverhältnis mit den realen Seitenlängen vor.
4. Die entstandenen Freiflächen werden mit einem *bottom-up-Verfahren* reduziert, indem die Maschinen zusammenrücken.

Das Layout wird mit einer Zielfunktion (100) bewertet, die den gewichteten Materialfluss w_{ij} und den euklidisch (direkt) bemessenen Abstand zwischen den Maschinen d_{ij} berücksichtigt. Diese lautet:

$$\text{flow} = 0,5 \cdot \sum_{i < j} (w_{ij} d_{ij}^2) \quad (100)$$

Zur Verbesserung der Lösung wird *genetic programming* eingesetzt, eine Erweiterung des genetischen Algorithmus. Hierbei werden die Individuen nicht als Chromosom, d.h. als binärer Vektor, dargestellt, sondern als Ausdrucksbäume (Programme). Der Algorithmus kombiniert die Beziehungsknoten und die Elementknoten zu einer Lösung. Die Verbesserungsoperationen sind identisch zu denen des genetischen Algorithmus (vgl. Abschnitt 11.2.6). Durch Selektion, Kreuzung und Mutation wird die Lösung mit jeder Generation verbessert. Der Algorithmus beginnt bei einem zufällig generierten Ausdrucksbaum und wird durch den gemessenen Fitnesswert der Zielfunktion zu einem optimalen Layout geleitet.

11.3 A*-Algorithmus

Der A*-Algorithmus dient zur Berechnung des kürzesten Pfads zwischen zwei Knoten s und z in einem zusammenhängenden kantengewichteten Graphen G . Ein Graph heißt zusammenhängend, wenn für je zwei Knoten ein Weg existiert. Die Gewichtung der Kante e (Weg) wird durch eine Funktion $g(e)$ definiert.

Der Algorithmus verwendet zur Pfadberechnung eine *Schätzfunktion* ($h(v)$), die für jeden Knoten v eine untere Schranke für den noch zu erwartenden Abstand (im Sinne der Pfadlänge) von v nach z liefert. Dadurch ergibt sich eine zielgerichtete Suche in Richtung des Endknotens.

Der A*-Algorithmus ist vollständig, da bei Existenz eines Pfads zum Zielknoten dieser auch gefunden wird. Die Suche verläuft optimal effizient, d.h. es gibt weder einen kürzeren Pfad als den gefundenen noch existiert ein vollständig optimales Suchverfahren, bei dem weniger Knoten betrachtet werden.

Die Berechnung des Pfads erfolgt über die Auswertungsfunktion

$$f(v) = k(v) + h(v).$$

Die Kostenfunktion $k(v)$ liefert die tatsächlichen Kosten vom Startknoten s zum Knoten v , während die Schätzfunktion $h(v)$ eine Schätzung über den Abstand des Knotens v zum Zielknoten z darstellt. Der Ablauf des Algorithmus ist wie folgt:

- Aufnahme des Startknotens s in die Liste aktueller Knoten LA
- Berechnung der Summe aus dem Abstand von s ($k(v)$) und dem Wert der Schätzfunktion ($h(v)$) für jeden Knoten v aus LA

- Ermittlung des Knotens w mit der geringsten Summe
- wenn $w=z$, dann wurde der kürzeste Pfad gefunden
- ansonsten Aufnahme der Nachfolger von w in LA (ist ein Nachfolger bereits enthalten, wird die Variante mit dem längeren Weg entfernt)
- wurde ein Knoten bereits besucht, und er ist nicht in LA enthalten, so wird er auch nicht hinzugefügt (Abfangen von Zyklen)
- wird LA leer, existiert kein Weg von s nach z

Abbildung 54 zeigt das Beispiel eines zusammenhängenden kantengewichteten Graphen. Die Kanten sind wie folgt gewichtet:

$$\begin{array}{lll}
 g(e): & (s,a) \rightarrow 3 & (s,b) \rightarrow 4 & (a,d) \rightarrow 1 \\
 & (a,c) \rightarrow 2 & (b,d) \rightarrow 3 & (c,e) \rightarrow 4 \\
 & (d,f) \rightarrow 1 & (e,z) \rightarrow 3 & (f,z) \rightarrow 2 \\
 & (d,f) \rightarrow 1 & (e,z) \rightarrow 3 & (f,z) \rightarrow 2
 \end{array}$$

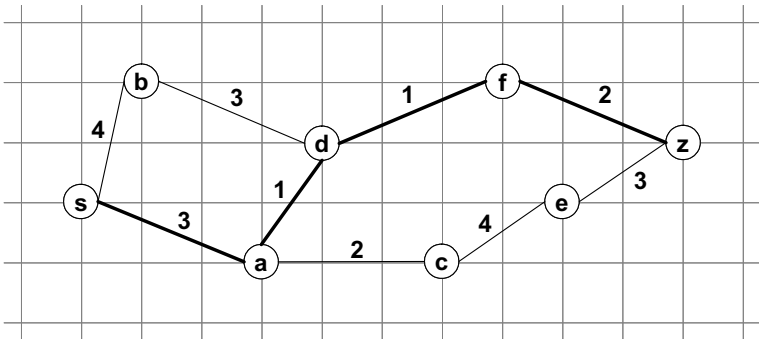


Abbildung 54: Beispiel eines zusammenhängenden kantengewichteten Graphen

Zur Berechnung der Schätzfunktion $h(v)$ wird der euklidische Abstand verwendet. Damit ergibt sich:

$$\begin{array}{llll}
 h(s) \rightarrow 10,64 & h(a) \rightarrow 7,48 & h(b) \rightarrow 9,48 & h(c) \rightarrow 4,48 \\
 h(d) \rightarrow 6,32 & h(e) \rightarrow 2,24 & h(f) \rightarrow 3,16 & h(z) \rightarrow 0
 \end{array}$$

Start: $LA = (s, 10,64)$ - expandiere s
 $LA = (a, 10,48), (b, 13,48)$ - expandiere a
 $LA = (b, 13,48), (c, 9,48), (d, 10,32)$ - expandiere c

11 Anhang

$LA = (b, 13,48), (d, 10,32), (e, 11,24)$

- expandiere d

$LA = (b, 13, 48), (e, 11,24), (f, 8,16)$

- expandiere f

$LA = (b, 13, 48), (e, 11,24), (z, 7)$

- Weg gefunden

Der kürzeste Pfad in diesem Beispiel lautet daher:

$s \rightarrow a \rightarrow d \rightarrow f \rightarrow z$

iwb Forschungsberichte Band 1–121

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

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

- 1 *Streifinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, J.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Grohe, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wirba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfrang, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschränkungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Götz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmabaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schräfer, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wisbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Glaas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helm, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayr, R.*
**Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeinrichtungen**
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
**Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware**
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
**Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrierobereinsatzes**
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dindorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
**Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen**
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
**Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung**
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*
**3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme**
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*
**Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen**
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
**Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik**
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
**Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler**
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
**Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen**
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
**Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld**
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
**Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge**
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
**Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion**
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
**Das integrierte Betriebsmittelwesen · Baustein einer
flexiblen Fertigung**
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*
**Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung**
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
**Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation**
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*
**Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung**
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
**Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen**
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
**Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen**
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
**Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung**
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
**Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen**
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
**Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement**
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
**Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen**
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
**Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen**
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Limmer, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
**Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme**
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deuschle, U.*
**Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in
mittelständischen Unternehmen**
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
 1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen
 1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
 1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
 1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
 1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
 1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen - Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
 1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
 1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
 1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
 1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
 1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
 1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
 1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
 1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
 1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
 1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Kräner, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitsuche und Standardisierung
 1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
 1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
 1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
 1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
 1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz
 1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
 1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermeier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
 1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
 1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
 1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
 1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
 1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
 1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgleitete Planung von Laseranlagen
 1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, 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, utz@utzverlag.com

- 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 · Produktivitätssteigerung durch technische und organisatorische Ansätze**
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 **Rapid Prototyping · Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung**
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 **Rapid Tooling · Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau**
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 **Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie · Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen**
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 **Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen**
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 **Stückzahlflexible Montagesysteme**
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 **Produktivität und Verfügbarkeit · ...durch Kooperation steigern**
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 **Automatisierte Mikromontage · Handhaben und Positionieren von 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 Füge-technologien für die Mikrosystemtechnik**
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 **Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln**
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**
- 62 **Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien**
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 **Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge**
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 **Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial**
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 **Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen**
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 **Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder**
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 **Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder**
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 **Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik**
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 **Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette**
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 **Mechatronik · Struktur- und Dynamik von Werkzeugmaschinen**
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 **Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten**
ISBN 3-89675-071-2 · erscheint 12/04
- 72 **Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen**
ISBN 3-89675-072-0 · erscheint 12/04
- 73 **Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen**
ISBN 3-89675-073-9 · erscheint 12/04
- 74 **Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik**
ISBN 3-89675-074-7 · erscheint 12/04
- 75 **Nicht erschienen – wird nicht erscheinen**

Forschungsberichte iwb

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

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

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

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

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

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

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4

